

Monitaajuusadmittanssi keskijännite- verkon maasulkusuojauksessa

Rauno Hirvonen

Opinnäytetyö

Joulukuu 2017

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), Sähkötekniikan koulutus ohjelma

Sähkövoimatekniikka

Tekijä(t) Hirvonen, Rauno	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2018
	Sivumäärä 67	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: kyllä
Työn nimi Monitaajuusadmittanssi keskijänniteverkon maasulkusuojauksessa		
Tutkinto-ohjelma Automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Puttonen Pasi		
Toimeksiantaja(t) SLT-Consults Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Sähkömarkkinalain muutokset sähkön toimitusvarmuuteen ovat aiheuttaneet sähköverkkojen laajoja muutoksia. Keskijännitteinen jakeluverkko sisältää muutosten seurauksena aikaisempaa enemmän maakaapeloituja johto-osuuksia, sekä sekaverkkoja, joissa on maakaapelia ja ilmajohtoa. Tämän seurauksena maasulku ilmiönä on muuttunut ja aiheuttanut ongelmia verkon suojauksessa.</p> <p>Työn tavoitteena oli asetella ja koestaa monitaajuusadmittanssiin perustuva suoja (MFADPSDE). Tästä prosessista koostettiin materiaali, jonka tuella soveltuvan koulutuksen saanut ja suojausasetteluihin perehtynyt henkilö kykenee asettelemaan ja koestamaan tällaisen suojaus. Opinnäytetyön avulla pyrittiin myös havainnollistamaan sitä, kuinka monitaajuusadmittanssiin perustuva suojaus eroaa perinteisemmistä suojausfunktioista.</p> <p>Työ jaettiin kahteen osaan: teoria- ja funktionaaliseen osaan. Teoriaosuudessa käsitellään maasulkuilmiötä yleisesti, sekä verkon muutosten aiheuttamia tarpeita maasulkusuojauselle. Lisäksi käsitellään pääpiirteittäin monitaajuusadmittanssisuojan toiminta, sekä tavat, joilla monitaajuusadmittanssiin perustuva suojaus vastaa verkon muutosten tuomiin haasteisiin. Opinnäytetyön toiminnallisen osan, eli asettelun ja koestamisen prosessikuvausten ja ohjeiden avulla monitaajuusadmittanssisuojaus voidaan tuottaa verrattain maltillisin resurssein.</p> <p>Loppupäätelmissä todettiin, että monitaajuusadmittanssisuojaus sopii hyvin etenkin katkeilevien maasulkujen suojaamiseen. Se ei vaadi normaalia enempää resursseja, ja toimii osin paremmin kuin perinteiset suojausfunktiot.</p>		
Avainsanat (asiasanat)		
Maasulkusuojaus, admittanssi, monitaajuus, koestaminen, suojaus		
Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Hirvonen Rauno	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2018
		Language of publication: Finnish
	Number of pages 67	Permission for web publication: yes
Title of publication Multi-Frequency Admittance-Based Earth-Fault Protection in Medium-Voltage Networks		
Degree programme Degree programme in Automation Engineering		
Supervisor(s) Puttonen Pasi		
Assigned by SLT-Consults Oy		
<p>Abstract</p> <p>Recent changes concerning the operational reliability in electricity networks in the Electricity Market Act have caused major changes in the networks. After these changes, medium voltage networks include more underground cabling than before, and hybrid networks containing both underground cables and overhead cables are more common than before. As a result, earth-fault as a phenomenon has changed, which causes new requirements in network protection.</p> <p>The aim was to set and test an earth-fault protection function based on multi-frequency admittance (MFADPSDE). Then, materials were written based on the process. Using the materials, a trained electricity networks professional, who understands the basics of network protection, can set and test such a protection. The materials and related theoretical background were also developed to make it easier for the reader to understand how MFADPSDE differs from more traditional functions.</p> <p>The work was divided into two parts: theory and functional. In the theoretical half, earth-fault as a phenomenon, as well as the challenges of protection caused by the changing networks, were considered in depth. Additionally, the basics of MFADPSDE were explored, as well as the ways in which it can be used to solve some of the challenges. With the functional part, namely the process descriptions and guidelines for setting and testing, the MFADPSDE can be used in electricity networks with moderate resources.</p> <p>It was concluded that MFADPSDE is an excellent solution to the challenges in earth-fault protection. It does not require more resources than more traditional functions, and in several ways, it works more reliably than its counterparts, especially in the protection of re-striking earth-faults.</p>		
Keywords/tags (subjects) Earth-fault, admittance, multi-frequency, test, protection		
Miscellaneous (Confidential information)		

Sisältö

1	Johdanto	5
1.1	Toimeksiantajan esittely	5
1.2	Työn tarve, sisältö ja tavoitteet	6
1.2.1	Tutkimuskysymykset	7
2	Maasulut ja niiden kompensointi ja suojaus	8
2.1	Maasulku maasta erotetussa keskijänniteverkossa	8
2.2	Maakaapeloinnin lisääntyminen ja sen vaikutukset	9
2.3	Maasulun vikatyypit	11
2.3.1	Maadoitusjännite	13
2.4	Maasulkuvirran kompensointi	15
2.4.1	Keskitetty kompensointi	17
2.4.2	Hajautettu kompensointi	18
2.4.3	Käytännön toteutus	19
2.5	Mittamuuntajat	19
2.5.1	Maasulkuvirran mittaaminen	20
2.5.2	Nollajännitteen mittaaminen	23
2.6	Suojareleet	25
3	Maasulkuvikojen suojausfunktiot	25
3.1	Monitaajuusadmittanssisuoja	28
3.1.1	Kumulatiivinen vektorisumma	29
3.1.2	Erilaisten suojausfunktioiden vertailua	32
3.1.3	Monitaajuusadmittanssi verrattuna perinteisempiin funktioihin	35
4	Maasulun suojausasettelut	35
4.1	Maasulkusuojauksen porrastus	38
4.2	Toimilohkon esittely	39
4.3	Monitaajuusadmittanssisuojan asetteleminen	41
4.4	Asettelut käytännössä	45
5	Koestaminen	45
5.1	Maasulkusuojauksen koestaminen	46

5.2	Monitaajuusadmittanssisuojan koestaminen Omicronilla	47
5.2.1	Havahtumisjännite	48
5.2.2	Pienin toimintavirta	50
5.2.3	Laukaisukulma.....	52
5.2.4	Laukaisuviive	53
5.2.5	Katkeilevan maasulun koestaminen.....	55
5.3	Huomioita koestamisesta.....	56
5.3.1	Ensimmäisen päivän koestukset	56
5.3.2	Toisen päivän koestukset.....	57
5.3.3	Koestamisen tulokset	58
5.3.4	Koestamisen kehittäminen	60
6	Pohdinta	61
	Lähteet	64

Kuviot

Kuvio 1. Pohjois-Karjalan Sähkö Oy:n hallinnoima alue.....	6
Kuvio 2. Maadoitus- ja kosketusjännitteet verkossa (SFS6001, 2015: 3.7.35).....	14
Kuvio 3. Kompensoidun maasulkuvirran käyttäytyminen sähköverkossa (Altonen & Wahlroos 2017, 5).....	16
Kuvio 4. Nollajännite vikaresistanssillisessa maasulussa (Lakervi & Partanen 2008, 18)	24
Kuvio 5. Nollajännitteen mittaaminen avokolmiosta (Wahlroos 2018a, 74).....	25
Kuvio 6. CPS-laskenta (Wahlroos & Altonen 2014, 3).....	30
Kuvio 7. CPS-laskennan perusteella saatu "stabiloitu" resistiivisen maasulkuvirran arvo katkeilevan maasulun aikana (Wahlroos & Altonen 2017, 34)	31
Kuvio 8. Maasulun laskentakaavojen erot: toimintasuureen vaikuttaminen vikavastuksen suuruudesta viallisella lähdöllä (Wahlroos & Altonen 2017, 15).....	32
Kuvio 9. Monitaajuusadmittanssisuojan toimintaperiaate kuvitettuna (Wahlroos & Altonen 2017, 35).....	35
Kuvio 10. Suojausfunktioiden toiminta (Wahlroos 2018a, 115)	37
Kuvio 11. MFADPSDE-lohkon asetteluikkuna (PCM600 kuvankaappaus, SLT-Consults 2018)	41
Kuvio 12. Asettelyryhmien asetteleminen (PCM600 kuvankaappaus, SLT-Consults 2018)	44
Kuvio 13. Askeleittain säätäminen (Omicron Test Universe).....	49
Kuvio 14. Rampin asettelu (Omicron Test Universe).....	49
Kuvio 15. Rampin hyväksytyt arvot (Omicron Test Universe).....	50
Kuvio 16. Pulssirampin asettelu (Omicron Test Universe).....	51
Kuvio 17. Laukaisukulmien testaaminen (Omicron Test Universe).....	52
Kuvio 18. Sekvenssi työkalun asettelu (Omicron Test Universe)	54
Kuvio 19. Testien suorittaminen automaattisesti (Omicron Test Universe).....	55

Taulukot

Taulukko 1. Ilmajohdon maasulkuvirta verrattuna tyypillisimpiin maakaapeleihin (Wahlroos & Altonen 2017, 4). Suomentanut alkuperäistä mukaillen Rauno Hirvonen.	11
Taulukko 2. Suurin sallittu kosketusjännite laukaisujan mukaan (Lakervi & Partanen 2008, 188)	14
Taulukko 3: Erään virtamuuntajan testiraportti (SLT-Consults 2018)	22
Taulukko 4. Toimilohkon signaalit (PCM 600)	39

1 Johdanto

1.1 Toimeksiantajan esittely

SLT-Consults Oy on perustettu vuonna 1989. Yhtiö tarjoaa teollisuuden sähkönjakelujärjestelmien ja sähköasemien rakentamis-, kunnossapito-, sekä asiantuntijapalveluita. Yhtiön pääasiallista asiakaskuntaa ovat sähköverkkoyhtiöt, suurteollisuus, sekä energiantuotantolaitokset Suomessa. Yhtiö tekee kokonaisvaltaista projektikonaisuuksien toteutusta, sekä osia niistä.

Yhtiön liikevaihto oli vuonna 2017 4 miljoonaa euroa. Henkilöstöä yhtiöllä on 12.

SLT-Consults Oy:n osakekannan omistaa kokonaisuudessaan Enerke Oy. Enerke Oy on verkoston kunnossapito- ja rakennusyhtiö, joka tarpeen mukaan tarjoaa SLT-Consults Oy:lle resursseja verkosto- ja sähköasematöissä. Yhteistyöstä on molemmille osapuolille hyötyä suurten kokonaisuuksien toteuttamisessa. Enerke Oy tarjoaa koko projektin kattavaa palvelua esisuunnittelusta loppudokumentteihin.

Pohjois-Karjalan Sähkö Oy on vuonna 1945 perustettu sähköverkkoyhtiö. Konserni työllistää 297 henkilöä ja asiakkaita on noin 86 300. Verkko kattaa suuren osan Itä-Suomea kuten kuviossa 1 huomataan. Konsernin liikevaihto on 119M€ ja investoinnit 17M€. Sähköverkkoa alueella on noin 21 000km.



Kuvio 1. Pohjois-Karjalan Sähkö Oy:n hallinnoima alue

Pohjois-Karjalan Sähkö Oy toimii emoyhtiönä muille konsernin yhtiöille, joita ovat tytäryhtiöt Enerke Oy, PKS sähkönsiirto Oy ja Kuurnan Voima Oy. PKS sähkönsiirto Oy vastaa verkon käytöstä ja valvonnasta.

1.2 Työn tarve, sisältö ja tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena on asetella ja koestaa monitaajuusadmittanssiin perustuva maasulkusuojaus keskijänniteverkon johtolähtöön. Tästä prosessista koostetaan materiaali, jonka avulla periaatteessa kuka tahansa soveltuvan koulutuksen saanut henkilö, joka on perehtynyt suojausasetteluihin, pystyy asettelemaan ja koestamaan tällaisen suojauksen. Lisäksi opinnäytetyössä perehdytään yleisesti maasulkusuojausfunktioihin. Koostetun materiaalin avulla on helpompi käsittää, kuinka monitaajuusadmittanssisuojaus eroaa perinteisemmistä suojausfunktioista.

Tässä työssä käsitellään tarkemmin maasulkua ja erilaisia maasulkutilanteita, sekä niiden laskentaa siinä määrin kuin se on tarpeellista suojan toiminnan kannalta. Työn tarkoituksena on selvittää 1) miten maasulkusuojausfunktiot toimivat ja millaista laskentaa niissä tapahtuu, 2) miten monitaajuusadmittanssisuojaus asetellaan ja mitä pitää ottaa huomioon sitä aseteltaessa, 3) miten sähköverkon kehittyminen vaikuttaa maasulkusuojaukseen ja mitä uusia tarpeita ja vaatimuksia se luo suojaukselle, sekä 4) miten monitaajuusadmittanssisuojaus toimii erityyppisissä verkoissa ja erityyppisillä sammutusratkaisuilla. Keskijänniteverkon tyyppisiä ovat esimerkiksi

verkot, joissa on sekä ilmajohtoa että maakaapelia. Erilaisia sammutusratkaisuja ovat esimerkiksi verkot, joissa on sekä keskitettyä että hajautettua kompensointia.

Työn tavoitteena on tehdä toimiva maasulkusuojaus 20kV:n johtolähtöön ja tuottaa siitä dokumentit, joita hyödyntämällä on helppo suunnitella sähköaseman kattavia maasulkusuojauksia ja maasulkusuojauksen asetteluita. Työn tarkoitus on toteuttaa suojaus käyttämällä monitaajuusadmittanssisuojauksia, joka on esimerkiksi ABB REF 630 -releen suojausfunktio.

1.2.1 Tutkimuskysymykset

Tässä tutkielmassa pyritään siis vastaamaan kysymykseen ”Kuinka monitaajuusadmittanssiin perustuvaa maasulkusuojausta voidaan hyödyntää keskijännitteisessä jakeluverkossa sen kehittyessä kohti säävarmempaa verkkoa?”. Kysymys on tärkeä siksi, että verkon rakenne on muuttumassa huomattavasti maakaapeloinnin lisääntyessä. Tämän muutoksen tapahtuessa verkon maasulkuvirrat kasvavat. Pää-tutkimuskysymystä tarkennettaessa on tarpeellista pohtia myös sitä, millä tavoin verkon muutokset vaikuttavat maasulkusuojauksen toimintaan.

Tutkielmassa haetaan myös vastauksia seuraaviin tarkentaviin kysymyksiin: 1) ”Millä tavoin monitaajuusadmittanssiin perustuva maasulkusuojaus on parempi kuin perinteisemmät maasulkusuojaukset ja millaisia etuja sillä saavutetaan verrattuna perinteisempiin suojiin?” ja 2) ”Pystyykö SLT-Consults hyödyntämään monitaajuusadmittanssiin perustuvaa maasulkusuojausta omissa projekteissaan? Pystytäänkö ohjeen avulla asettelemaan suojauksia luotettavasti perinteisten maasulkulaskelemien perusteella, ja jos pystytään, kuinka asettelu tehdään (laskelmat, asettelut, prosessi, koestus)?”

Työn aikana hankittu osaaminen ja kokemus, sekä asetteluohjeet ja valmiit koestusohjelmat jäävät toimeksiantajalle. Näiden dokumenttien avulla SLT-Consults Oy pystyy tuotteistamaan monitaajuusadmittanssiin perustuvan maasulkusuojauksen suhteellisen vähin resurssein. Tutkimuksesta hyötyvät myös kaikki alalla toimivat yritykset, sekä alan opiskelijat, koska työ on vapaasti saatavilla sen valmistumisen jälkeen. Lisäksi tutkimus pyrkii olemaan puolueeton, eivätkä suojauksen kehittäjät ole osallistuneet tutkielman rahoittamiseen.

2 Maasulut ja niiden kompensointi ja suojaus

Koska admittanssisuojaus on uudehko innovaatio, siitä kertovaa kirjallisuutta on tällä hetkellä saatavilla rajoitetusti. Tätä työtä varten tietoa on haettu muista lähteistä, muun muassa suojausta kehittäneiden yhtiöiden kautta. Esimerkiksi ABB on kehittänyt suojausfunktioita (mm. monitaajusadmittanssisuojauksen). Heidän julkaisuistaan olen saanut hyvää yleistietoa suojauksen toiminnasta. Lisäksi olen ollut yhteydessä myös suoraan ABB:n suojauskehittäjiin. He ovat toimittaneet täydentäviä materiaaleja, joiden avulla tämän työn teoriaperustaa on tarkennettu ja täydennetty.

Tietoperustaa kerätessäni huomasin alasta kertovan suomenkielisen kirjallisuuden olevan monessa mielessä hieman puutteellista tai tietoa ei ollut varsinaisiin oppikirjoihin vielä kirjoitettu. Haluankin tässä kiittää erityisesti ABB:n suojauskehittäjää Ari Wahlroosia, joka on tukenut opinnäytetyön kirjoittamista ja luovuttanut materiaalia käyttöni siinä määrin kuin se on ollut tarpeen. Wahlroos on ollut kehittämässä monitaajusadmittanssiin perustuvaa maasulkusuojausta ja näin ollen hänellä on ensikäden tietoa funktion toiminnasta sekä maasulusta ilmiönä.

2.1 Maasulku maasta erotetussa keskijänniteverkossa

SFS 6001 -standardi (SFS 6001, 2015: 3.7.24–3.7.27) määrittelee, että maasulku on sähköverkon vika, jossa vähintään yksi virrallinen johdin osuu maahan suoraan tai vikaresistanssin kautta. Maasulku voi vikana esiintyä kaiken tyyppisissä sähköverkoissa. Luonteeltaan maasulut ovat kuitenkin hyvin erilaisia maasta erotetuissa ja sammutetuissa verkoissa verrattuna muihin verkon maadoitustapoihin. Maasta erotetun ja sammutetun verkon maasulkusuojaus onkin haastavampaa kuin maadoitettujen verkkojen maasulkusuojaus.

Maasulku on keskijänniteverkon vioista kaikkein yleisin sekä ilmajohdoilla että maakaapeleilla (Aalto 2018). Lakervin ja Partasen (2012, 182–183) mukaan maasulkuvirran aiheuttaa ilmajohdoilla ja maakaapeleilla oleva kapasitanssi maan ja jännitteellisen johtimen välillä. Maan ja jännitteisen johtimen välillä olevaa kapasitanssia kutsutaan maakapasitanssiksi. Maakapasitanssit aiheuttavat maasulkuviassa syntyvän

maasulkuvirran, joka latautuu terveissä vaiheissa ja summautuu verkon tähtipisteessä. Tähtipisteestä maasulkuvirta kulkeutuu vikapaikkaan.

2.2 Maakaapeloinnin lisääntyminen ja sen vaikutukset

Maakaapelointi ja maakaapeliverkkojen maasulkusuojaus on tällä hetkellä Suomen keskijänniteverkossa yksi ajankohtaisimmista aiheista. Syynä tähän on v. 2013 uudistettu sähkömarkkinalaki, jossa määritellään muun muassa sähköverkon käyttövarmuus sähköverkkoyhtiöille. Uudessa laissa määritellään, että jakeluverkon käyttövarmuutta on lisättävä portaittain vuoteen 2029 mennessä. (Sähkömarkkinalaki 588/2013, 119 §.)

Sähkömarkkinalaissa pykälässä 51 § määritellään jakeluverkon toiminnan laatuvaatimukset:

- 1) verkko täyttää järjestelmävastaavan kantaverkonhaltijan asettamat verkon käyttövarmuutta ja luotettavuutta koskevat vaatimukset;
- 2) jakeluverkon vioittuminen myrskyn tai lumikuorman seurauksena ei aiheuta asemakaava-alueella verkon käyttäjälle yli 6 tuntia kestäväää sähkönjakelun keskeytystä;
- 3) jakeluverkon vioittuminen myrskyn tai lumikuorman seurauksena ei aiheuta muulla kuin 2 kohdassa tarkoitettulla alueella verkon käyttäjälle yli 36 tuntia kestäväää sähkönjakelun keskeytystä. (Sähkömarkkinalaki 588/2013, 51§.)

Uuden lain voimaantulon taustalla ovat 2000-luvun alussa Suomessa riepottelleet suurmyrskyt, jotka aiheuttivat laajoja sähkökatkoja ympäri maata. Uuden lain tarkoituksena on vähentää ja pyrkiä estämään tällaiset laajat suurhäiriöt, joita suuret myrskyt ovat aiheuttaneet Suomessa viimeisten vuosikymmenien aikana. (HE 218/2002: 5.1). Esimerkiksi Elenian 420 000 asiakkaasta oli tapaninpäivän myrskyssä 2011 sähköttöä noin 102 000 asiakasta (Aalto 2018).

Yksi tapa parantaa sähkönjakelun varmuutta keskijänniteverkoissa on lisätä maakaapeloinnin osuutta verkossa. Näin tekemällä vähennetään sääolojen vaikutusta sähköverkkoon. Maanpinnan alapuolella oleviin kaapeleihin kaatuvat puut tai lumi-

kuormat eivät pääse aiheuttamaan vahinkoja. (Aalto 2018). Toinen tapa jakelun varmuuden parantamiseen on linjata ilmajohtoja esimerkiksi teiden varsille, joissa johdotkadut ovat luonnostaan leveämpiä ja niiden huoltaminen helpompaa verrattuna keskellä metsää oleviin ilmajohtoihin. (Wahlroos 2018)

Kuten kaavasta 1 voimme päätellä, kapasitanssiin (C) vaikuttaa permittiivisyys (ϵ), pinta-ala (A) jännitteisen osan ja maan välillä, sekä pintojen välinen etäisyys (d).

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d} \quad (1)$$

Kaava on määritetty tasojen välille, mutta käytännössä sama pätee myös muille pinoille. Tasojen välinen kaava on selvästi yksinkertaisin selittää, joten sitä on hyvä käyttää esimerkkinä havainnollistamaan maakapasitanssin muodostumista. Käytännössä siis mitä suurempi permittiivisyys ja pinta-ala, ja mitä pienempi etäisyys, sitä suurempi on kapasitanssin arvo. Verrattaessa ilmajohdon ja maakaapelin sähköisiä ominaisuuksia, suurin ero on niiden maakapasitanssissa. Tämä ero johtuu pääosin maan ja johtimen välisestä etäisyydestä maapotentiaaliin. Ilmajohdolla johtimen etäisyys maapotentiaaliin on useita metrejä, kun taas maakaapelilla se on vain senttejä, koska kaapelin vaippa on maadoitettu. (Wahlroos & Altonen 2017, 4)

Ero maakaapelin ja ilmajohdon tuottamassa maasulkuvirrassa on merkityksellinen. Maakaapeli tuottaa kymmeniä kertoja suuremman maasulkuvirran. Taulukossa 1 on esitetty muutamia erilaisia laskennallisia arvoja ilmajohtojen ja maakaapeleiden välillä. Taulukon vertailusta käy ilmi, että maakaapeloinnin seurauksena kaapeleiden tuottama maasulkuvirta kasvaa huomattavasti. Ilmajohdoilla maasulkuvirta on keskimäärin vain 0,07 A/km, kun taas maakaapeleilla vastaava maasulkuvirta on 2-5 A/km. (Wahlroos & Altonen 2017, 4)

Maasulkuvirran kasvaminen johtaa entistä suurempiin maadoitusjännitteisiin ja siten myös suurempiin kosketusjännitteisiin, joita käsitellään luvussa 2.3.1. Kosketusjännitteen nousemisen seurauksena vaara saada kuolettava sähköisku vikapaikan ympärillä nousee huomattavasti. (Lakervi & Partanen 2008, 186–187)

Maasulkuvirran kasvaessa on tärkeää ehkäistä kosketusjännitteen nouseminen vaarallisen suureksi. Tämän takia maakaapeloinnin aiheuttama maasulkuvirran kasvaaminen on ongelmallista, ja maasulkuvikojen nopea ja selektiivinen poiskytkentä on entistä tärkeämpää.

Taulukko 1. Ilmajohdon maasulkuvirta verrattuna tyypillisimpiin maakaapeleihin (Wahlroos & Altonen 2017, 4). Suomentanut alkuperäistä mukaillen Rauno Hirvonen.

Johdin tyyppi	Maakapasitanssi (C_0) $\mu\text{F/km}$	Maasulkuvirta (A/km) $U=20\text{kV}$		Ilmajohdon ja maakaapelin tuottaman maasulkuvirran suhde
Ilmajohdot	0,0061	0,07	A	1,0
maakaapeli 3x70mm ²	0,18	1,96	A	29,5
maakaapeli 3x120mm ²	0,23	2,50	A	37,7
maakaapeli 3x185mm ²	0,26	2,83	A	42,6
maakaapeli 3x240mm ²	0,30	3,26	A	49,2

Taulukossa 1 on esitetty yleisimmät kaapelityypit, joita keskijänniteverkossa käytetään. Tyypillisesti maakapasitanssi (C_0) on maakaapeleilla monikymmenkertainen verrattuna ilmajohdoton. Maakapasitanssin kasvaminen johtaa maasulkuvirtojen kasvamiseen monikymmenkertaiseksi olettaen, että johtojen pituutta ei voida lyhentää. (Wahlroos & Altonen 2017, 4)

2.3 Maasulun vikatyypit

Erilaisia maasulkuvikatyyppejä on useita. Aallon (2018) mukaan yleisin niistä on yksivaiheinen maasulku, jossa esimerkiksi kaivinkoneella rikotaan maakaapelista yhden vaiheen vaippa, tai puu kaatuu ilmajohdon päälle. Maasulkuvirran suuruus yksivaiheisissa maasuluissa riippuu koko galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pituudesta, johtimien maakapasitansseista, vikavastuksesta, verkon maadoitustavasta ja jännitteestä.

Katkeileva maasulku on yleinen yksivaiheinen maasulkuvika etenkin kompensoidussa maakaapeloidussa keskijänniteverkossa. Katkeileva maasulku on suojausmielessä hankala, sillä sille ominaisia piirteitä ovat satunnainen toistuvuus ja suuret lyhytaikaiset virtatransientit, jotka ovat kestoaltaan tyypillisesti alle millisekunnin mittaisia ja voimakkuudeltaan satoja tai jopa tuhansia ampeereita. Transientit toistuvat tyypillisesti 5-500 ms välein. Katkeileva maasulku on todettu olevan perinteisille

maasulkusuojausfunktioille erittäin haastava vikatyyppe, joka aiheuttaa riskin suojauksen luotettavuudelle sekä virheellisille laukaisuille. Tämä onkin suojauksen kehittämisessä ollut yksi tärkeimpiä ja haastavimpia kohteita. (Wahlroos & Altonen 2014, 4–5)

Erona maasuluille ilmajohtoverkossa ja maakaapeloidussa verkossa voidaan pitää sitä, että ilmajohtolla tapahtuvat maasulkuviat ovat yleensä esimerkiksi kosteuden tai oksien aiheuttamia, jolloin vika voi korjaantua itsestään jälleenkytkentöjen aikana, koska eristeaineena toimii ilma ja valokaaren sammuttua ilman eristyskyky palaa ennalleen. Maakaapeleilla viat johtuvat yleensä eristeaineen (muovi, paperi) heikentyneestä eristyskyvystä, eivätkä ne tavallisesti korjaannu itsestään. Keskijänniteverkon sisältäessä sekä maakaapelia että ilmajohtoa on tärkeää pohtia jälleenkytkentöjen käyttämistä verkossa. Maasulun ollessa maakaapeloidussa johto-osassa jälleenkytkentöjen tekeminen on hyödytöntä ja voi aiheuttaa vian kehittymisen kaksoismaasuluksi tai oikosuluksi. (Lehesvuo 2018)

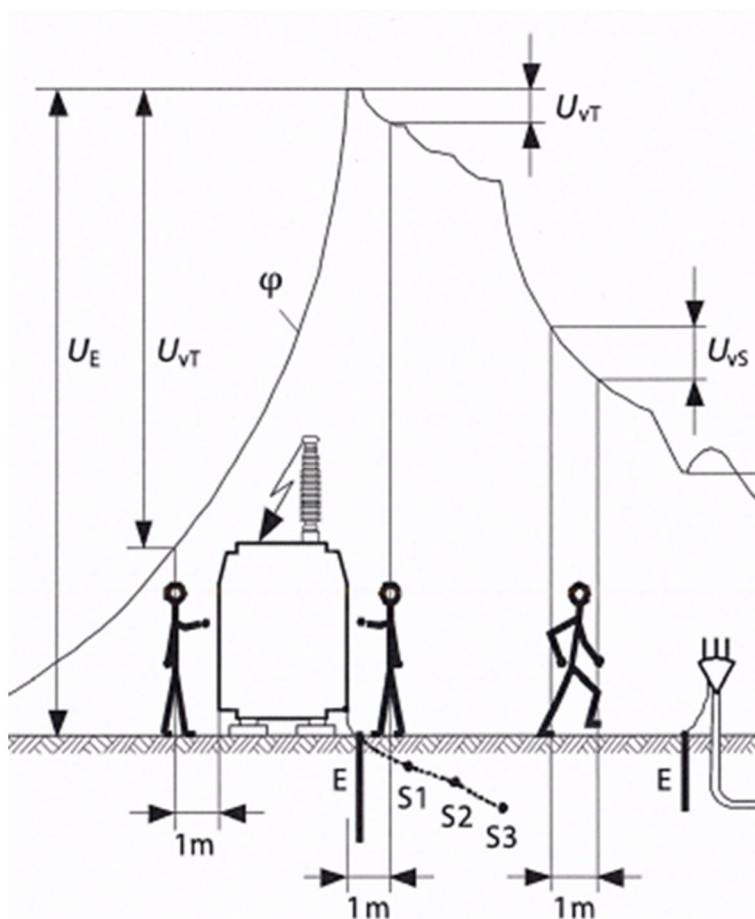
Kuten Lakervi ja Partanen (2008,197–199) toteavat, katkeilevat maasulkuviat kaapeloidussa verkossa syntyvät tyypillisesti paikoissa, joissa kaapelin eristys on pysyvästi huonontunut. Tavallisimmin eristeaurio syntyy paikkoihin, joissa kaapelia on jouduttu työstämään, esimerkiksi kaapelipäätteisiin ja jatkoksiin. Katkeileva maasulku on tärkeää huomata heti sen syntyessä, jolloin vika ei vielä ole ehtinyt aiheuttaa laajaa tuhoa. Jos vikaa ei kytketä pikaisesti irti verkosta, aiheuttaa se mitä todennäköisimmin vakavamman oikosulkuvian myöhemmin. Oikea-aikaisella irtikytkennällä tällaiset ongelmat voidaan usein välttää täysin. Oikosulkuvioissa vahingot ovat yleensä huomattavasti mittavampia, niin kustannuksellisesti kuin työmäärällisestikin. Lakervi ja Partanen jatkavat, että toinen yleinen maasulkuvika on kaksoismaasulku. Kaksoismaasulku syntyy yleensä yksivaiheisen maasulun seurauksena: Yksivaiheinen maasulku nostaa terveiden, eli vikaantumattomien vaiheiden jännitettä, jolloin syntyy läpilyönti muualla verkossa (toisessa vaiheessa) huonojen tai vaurioituneiden eristeiden takia toisen vaiheen ja maan välille. Kaksoismaasulussa kaksi vaihetta on yhteydessä maan kautta toisiinsa, jolloin vikavirrassa on mukana myös oikosulkuvirtaa. Siten vikavirta kaksoismaasuluissa on yleensä huomattavasi suurempi kuin yksivaiheisissa maasuluissa.

2.3.1 Maadoitusjännite

Maasulkusuojauksella pyritään ensisijaisesti parantamaan keskijänniteverkon henkilösuojauksella ja siten tekemään verkosta turvallisempi ihmisille ja eläimille. Maasulkuvian aikana vikapaikan ympärillä vaikuttaa maadoitusjännite U_E . Maadoitusjännite on jännitteisen osan potentiaalin ja kaukana olevan todellisen maapotentiaalin välinen jännite. Maadoitusjännite lasketaan kaavan 2 mukaan. Kaavassa I_E on maa-virta ja Z_E on maadoitusimpedanssi. (SFS6001, 2015: 3.7.35)

$$U_E = I_E \cdot Z_E \quad (2)$$

Maadoitusjännitteestä muodostuu ihmisen kosketettavissa oleva kosketusjännite (U_{VT}). Kuviossa 2 on esitelty kaksi eri kosketusjännitettä. Vasemmanpuoleinen suurempi kosketusjännite kuvastaa kosketusjännitettä paikassa, jossa ei ole tehty potentiaalinohjausta. Oikeanpuoleinen kosketusjännite kuvastaa kosketusjännitettä paikassa, johon on tehty potentiaalinohjaus. Potentiaalinohjausrenkaat on merkitty kuvioon merkinnöillä S1-S3. Kuten kuvasta huomataan, kosketusjännite pienenee huomattavasti oikein tehtyjen potentiaalinohjausten avulla. (SFS6001, 2015: 3.7.35). Potentiaalinohjauksen avulla potentiaaliero vikapaikan läheisyydessä pienenee huomattavasti ja näin ollen ihmiseen vaikuttava kosketusjännite on myös huomattavasti pienempi.



Kuvio 2. Maadoitus- ja kosketusjännitteet verkossa (SFS6001, 2015: 3.7.35)

Suurin sallittu kosketusjännite (U_{TP}) nähdään taulukosta 2 laukaisuaajan perusteella. Laukaisuaika on aika, joka kestää vian alkamisesta siihen, kun vika on kytketty irti verkosta. Kuten taulukosta huomataan, laukaisuaajan lyhentäminen kasvattaa kosketusjännitteen suurinta sallittua arvoa. (Lakervi & Partanen 2008, 189)

Taulukko 2. Suurin sallittu kosketusjännite laukaisuaajan mukaan (Lakervi & Partanen 2008, 188)

Laukaisuaika (s)	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
U_{TP} [V]	390	280	215	160	132	120	110	110

Suurin sallittu maadoitusjännite lasketaan kaavalla 3. U_E on maadoitusjännite. Kerroin F määräytyy maadoitusolosuhteiden ja tehtyjen maadoitusten ja potentiaali-ohjausten perusteella. Kertoimen avulla saadaan kasvatettua suurinta sallittua kosketusjännitteen arvoa. Tavoitetasona pidetään $F=2$, mutta teknisten ja taloudellisten seikkojen takia monesti päädytään arvoon $F=4$. Arvoa voidaan kasvattaa neljään,

mikäli maaperä on huonosti sähköä johtavaa, muuntamoille tehdään potentiaalinhojaus ja jokaisen pienjänniteverkon haarassa on vähintään yksi johtohaaran maadoitus. (SFS6001, 2015: NA.11.1.3).

$$U_E \leq F \cdot U_{TP} \quad (3)$$

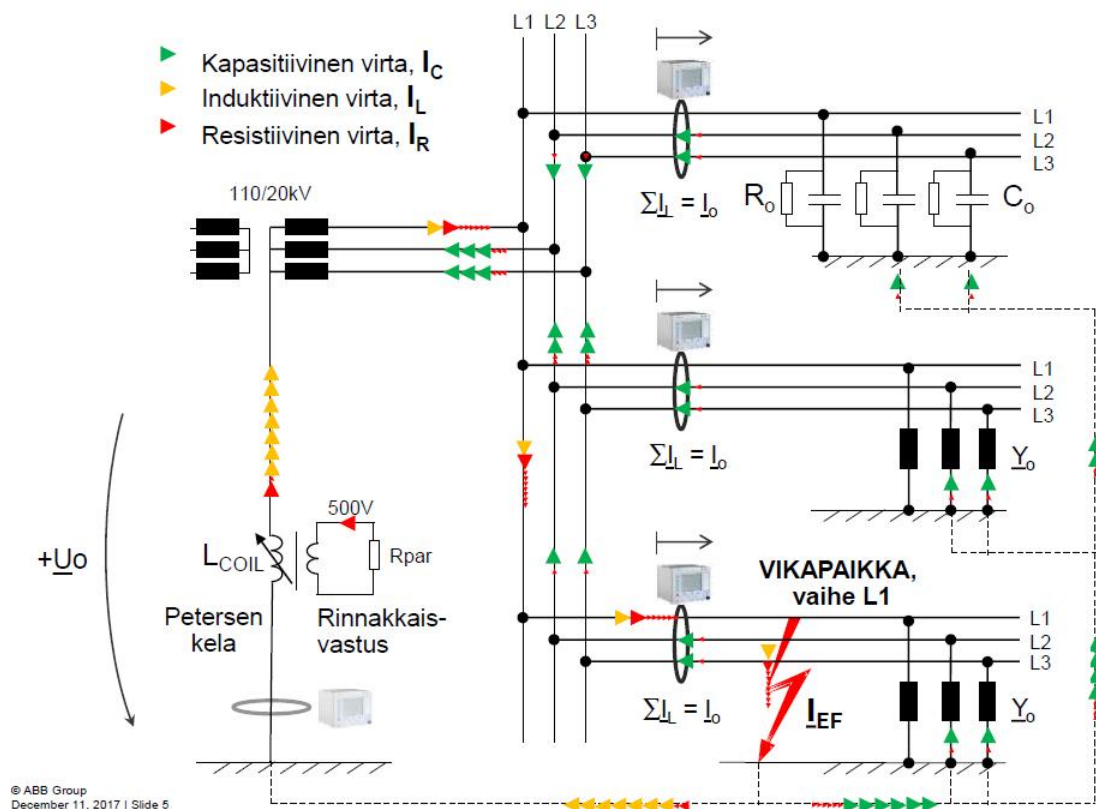
Mikäli maadoitusjännite(U_E) ylittää suurimman sallitun kosketusjännitteen(U_{TP}) arvon, eikä kerrointa F pystytä enää kasvattamaan, saadaan maadoitusjännitettä pienennettyä pienentämällä maasulkuvirtaa. Maasulkuvirtaa voidaan pienentää esimerkiksi pienentämällä galvaanisesti yhdessä olevaa verkkoa, eli lisäämällä päämuuntajia ja jakamalla verkko osiin. Toinen vaihtoehto on käyttää maasulkuvirran kompensointia. Päämuuntajan lisääminen verkkoon tarkoittaa yleensä sitä, että sähköasemalle joudutaan tekemään suuria muutostöitä tai rakentamaan kokonaan uusia sähköasemia. Kompensointilaitteiston lisäämiseen riittää yleensä yksi tyhjä kenttä sähköaseman kojeistossa, johon kompensointilaitteisto voidaan liittää. Näistä taloudellisesti kannattavampaa on yleensä asentaa kompensointilaitteisto. (Lakervi & Partanen 2008, 189)

2.4 Maasulkuvirran kompensointi

Maasulkuvirran kompensoinnilla tarkoitetaan verkon tähtipisteeseen liitettävää maadoituskuristinta eli maasulun sammutuskelaa. Kelalla tuotetaan induktiivista virtaa, joka kompensoi kaapeliverkon tuottamaa kapasitiivista virtaa verkon tähtipisteessä. Maasulkuvirran kompensointi jaetaan kahteen tapaan: keskitettyyn ja hajautettuun kompensointiin. (Lakervi & Partanen 2008, 184, 189)

Kompensoidun verkon toiminnan havainnollistamiseksi kuviossa 3 on kuvattu maasulkuvirran muodostumista kompensoidussa verkossa yksivaiheisen maasulkuvian aikana. On tärkeää huomata, että verkon kapasitiiviset virrat kompensoidaan muuntajan tähtipisteessä, joka tässä kuvassa on verkon ainoa tähtipiste. Kompensoinnin seurauksena vikapaikkaan kulkevassa virrassa on jäljellä sekä resistiivinen (merkitty kuvassa punaisella) että induktiivinen (merkitty kuvassa keltaisella) komponentti. Esimerkkikuvassa verkko on hieman ylikompensoitu. Alikompensoidussa verkossa vikapaikan virrassa olisi resistiivisen komponentin lisäksi kapasitiivinen virtakomponentti. Kuvan perusteella on helppo hahmottaa virtojen käyttäytymistä

maasulun aikana, sekä havainnollistaa kompensoinnin merkitystä maasulun aikana. Kompensoimattomassa verkossa kaikki kuusi vihreää nuolta, jotka kuvaavat verkon maakapasitanssien aiheuttamaa kapasitiivista maasulkuvirtaa, kulkisivat vikapaikkaan ja nostaisivat maasulkujännitettä vikapaikassa. (Altonen & Wahlroos 2017, 5).



Kuvio 3. Kompensoidun maasulkuvirran käyttäytyminen sähköverkossa (Altonen & Wahlroos 2017, 5)

Wahlroos ja Altonen (2017, 4-6) toteavat, että perinteisesti kompensointikelan virittäminen tehdään mittaamalla nollajännitettä ja säätämällä kelan tuottamaa induktiivista virtaa. Kelan tuottaman virran ollessa resonanssissa verkon tuottaman kapasitiivisen virran kanssa, nollajännite saavuttaa terveen tilan huippuarvon. Kompensointikelaa ei voida tavallisesti virittää tarkalleen resonanssiin, jossa induktiivinen virta kompensoisi täysin kapasitiivisen virran, koska nollajännitteen nouseminen ja värähtely heikentävät suojauksen tarkkuutta. He jatkavat, että tästä syystä kompensointi viritetään joko suhteellisesti tai kiinteän ampeerimäärän verran sivuun resonanssivirrasta. Esimerkiksi kompensoidaan 95% kompensoimattoman verkon maasulkuvirrasta, tai vaikkapa viisi ampeeria alle resonanssivirran. Kelan virittämi-

nen on aina hieman tapauskohtaista ja riippuu siitä, millaista verkkoa asema syötää, lähtöjen pituuksista, sekä maakaapelin ja ilmajohdon suhteesta verkossa. Maakaapelointi vähentää terveen tilan nollajännitteen kasvamista, jolloin resonanssijännite terveessä tilassa pienenee ja kompensointikelan virittäminen hankaloituu. Tästä syystä on kehitetty virransyöttölaitteita kompensointikelan säätäjille, joilla syötetään ennalta tiedettyjä virtapulseja säännöllisin väliajoin, joiden perusteella kompensointia viritetään.

Kuvion 3 tapauksessa kompensointikelan rinnalle on kytketty lisävastus. Lisävastuksen tehtävänä on pienentää terveen tilan nollajännitettä, sekä kasvattaa maasulkuvirran resistiivistä komponenttia. Näillä parannetaan suojauksen tarkkuutta ja selektiivisyyttä. (TTT-käsikirja 2000)

2.4.1 Keskitetty kompensointi

Maviko Oy (2018) määrittelee, että keskitetyllä kompensoinnilla tarkoitetaan maasulkuvirran kompensointia suoraan sähköasemalla, eli päämuuntajan tähtipisteessä. Aina kuitenkin ei voida käyttää suoraan päämuuntajan tähtipistettä, jolloin se luodaan tähtipistemuuntajan (maadoitusmuuntajan) avulla. Keskitetyn kompensoinnin etuna hajautettuun kompensointiin on, että sillä pystytään kompensoimaan koko sähköaseman maasulkuvirtoja. Tämä tarkoittaa kaikkien asemalla olevien lähtöjen synnyttämää maasulkuvirtaa. Toinen merkittävä etu on siinä, että sähköasemalla ovat myös tilat, joissa säätäjät ja niiden elektroniset laitteet saadaan suojaan valvottuihin olosuhteisiin. Lisäksi siellä on saatavilla säätäjille tarpeelliset ohjausjännitteet. Sähköasemilta on myös olemassa yhteys valvomoon, josta pystytään seuraamaan reaaliajassa säätäjän toimintaa, sekä tarpeen mukaan voidaan asettaa säätäjä käsikäytölle tai kompensointi voidaan irrottaa verkosta. (Pesonen 2015, 18–19.)

Kun maasulkuvirran kompensointilaitteisto liitetään suoraan päämuuntajan tähtipisteeseen, ongelmaksi muodostuvat varasyöttötilanteet. Kun sähköasema liitetään varasyöttöön ja päämuuntaja kytketään pois, menetetään myös tähtipisteeseen liitetty maasulkuvirran kompensointilaitteisto. Yleensä varasyötön kompensointilaitteisto ei pysty kompensoimaan koko varasyötettävän sähköaseman maasulkuvirtoja, ja tästä syystä verkko jää alikompensoiduksi, eikä sitä välttämättä voida käyt-

tää turvallisesti. (Pesonen 2015, 18–19, 39). Tämä konkretisoituu enimmäkseen pienillä kuormilla olevilla maaseutuverkoilla, joilla aseman varasyöttäminen on mahdollista keskijänniteverkon kautta. Suurilla kuormilla tällainen ei yleensä ole mahdollista.

Vihavainen (2018) toteaa, että nykyisin uutta sähköasemaa rakentaessa keskitetty maasulkuvirran kompensointi toteutetaankin yleensä tähtipistemuuntajan avulla, jolloin sitä ei tarvitse huomioida päämuuntajaa valittaessa. Lisäksi etuna on myös se, että kompensointia voidaan hyödyntää myös sähköaseman varasyöttötilanteissa. Tähtipistemuuntajalla luodaan verkkoon uusi tähtipiste, johon voidaan liittää kompensointilaitteisto.

2.4.2 Hajautettu kompensointi

Hajautetulla kompensoinnilla tarkoitetaan maasulkuvirran kompensointia johtosuuksien varrella. Tällainen kompensointilaitteisto koostuu maadoitusmuuntajasta ja kompensointikelasta. Maadoitusmuuntajalla luodaan tähtipiste, johon kompensointikela voidaan liittää. (Maviko 2015). Hajautettu kompensointi on tarpeellista pitkillä johto-osuuksilla, joiden tuottama maasulkuvirta on huomattavan suuri (Pesonen 2015, 19).

Mavikon (2015, 6) mukaan hajautettu kompensointi mitoitetaan yleensä alikompensoiduksi, koska hajautettu laitteisto ei ole säädettävissä käytön aikana. Syöttävällä sähköasemalla tällainen hajautetulla kompensoinnilla kompensoitu lähtö periaatteessa näyttää vain lyhyemmältä johtolähdeltä. Tällöin syöttävällä sähköasemalla oleva maasulkusuoja pystyy vielä havaitsemaan johtolähdöllä olevan maasulun ja maasulkuvirran suunnan luotettavasti. Hajautetulla kompensoinnilla voidaan myös vaikuttaa pitkien lähtöjen synnyttämän nollavirran pätökomponentin kasvuun kompensoimalla maasulkuvirta jo lähellä sen syntymistä (pitkien johto- tai kaapeliosuuksien varsilla). (Pesonen 2015, 39)

Hajautettu kompensointi on nimenomaan pitkien kaapelilähtöjen kompensoinnissa suositeltu tapa. Oikein sijoitettuna tällainen kompensointilaitteisto toimii myös lähdön varasyöttötilanteessa (Maviko 2015, 4). Tällöin pitkä kaapelilähtö voidaan liittää toisen aseman syöttöön, eikä se aiheuta varasyöttävän aseman keskitetyn

kompensoinnin kannalta yhtä suurta kuormitusta varasyöttävälle asemalle kuin ilman hajautettua kompensointia oleva lähtö. Hajautetulla kompensointilaitteistolla voidaan siis vaikuttaa keskitetyn kompensoinnin mitoittamiseen myös varasyöttämisen näkökulmasta. Keskitettyä kompensointilaitteistoa ei tarvitse ylimitoittaa niin suuresti, kun hajautettu kompensointi suunnitellaan hyvin.

2.4.3 Käytännön toteutus

Vaikka maasulkuvirran kompensointi jaetaan kahteen eri tapaan (hajautettuun ja keskitettyyn kompensointiin), on monesti käytännön ratkaisuna näiden yhdistelmä (Maviko 2018). Sähköasemalle asennetaan keskitetty kompensointilaitteisto, jolla pystytään kompensoimaan tietty osa syntyvästä maasulkuvirrasta, esimerkiksi asemalta lähtevät lyhyet lähdöt ja pitkien lähtöjen hajautetusta kompensoinnista ylijäävä osa, sekä lisäksi marginaali mahdollisia lisäyksiä ja varasyöttötilanteita varten. Taajamien sähköverkoissa monesti lähdöt ovat pituudeltaan niin lyhyitä, ettei hajautetun kompensoinnin käyttäminen ole perusteltua. (Pesonen 2015, 39)

2.5 Mittamuuntajat

Elovaaran ja Laihon (1988, 271-275) mukaan keskijänniteverkon virrat ja jännitteet ovat sellaisenaan hengenvaarallisia, eikä niitä voida käsitellä helposti millään mittalaitteella niiden suuruuden vuoksi. He jatkavat, että ratkaisuksi on kehitetty mittamuuntajia, joiden toisiopiirit ovat galvaanisesti erillään keskijännitteisestä ensiöpiiristä. Mittamuuntajien tehtävänä on toistaa ensiöpiirin suureet, kuten virta, jännite ja niiden kulmat mahdollisimman tarkasti halutulla mittausalueella. Lisäksi niiden tehtävä on suojata toisiomittalaitteita ja ehkäistä niiden rikkoutumista, sekä mahdollistaa mittalaitteiden sijoittaminen eri tilaan keskijännitekomponenttien kanssa. Elovaara ja Laiho huomauttavat, että mittamuuntajia valittaessa tulee kiinnittää huomiota useisiin asioihin. Esimerkiksi tulee valita käyttötarkoitukseen sopiva muuntosuhde. Muuntosuhteella tarkoitetaan aluetta, jolla mittamuuntaja on tarkoitettu käytettäväksi. Esimerkiksi virtamuuntajalle tyypillinen arvo on 150/5A. Muuntajan arvo 150 kertoo virran nimellisen arvon, jota mittamuuntajalla on tarkoitettu mitata. Jälkimmäinen merkintä 5A kertoo nimellisen toisiovirran mitattaessa 150 ampeerin virtaa.

Mittamuuntajille annetaan standardeissa tarkkuusluokat, koska erilaiset tilanteet vaativat erilaisia tarkkuusluokkia. Suojaukseen käytettävät tarkkuusluokat voidaan tunnistaa tarkkuusluokkanumeron jälkeen olevasta P-kirjaimesta, esimerkiksi 3P tai 6P. Tarkkuusluokka kertoo jännitteen tai virran amplitudi-, sekä kulmavirheen. Virheet ilmoitetaan muuntajan nimellisarvoille, joten mitattaessa suurempia tai pienempiä suureita voi mittaustarkkuus muuttua paljonkin. Tämä on tärkeä ottaa huomioon valittaessa mittamuuntajia. (Elovaara & Laiho 1988, 272-275)

Tarkkuusluokan jälkeen ilmoitetaan tarkkuusrajakerroin, joka on nimellisen virran kerroin, jolla virtamuuntaja kyllästyy. Esimerkiksi 100/5 5P25 tyyppimerkinnällä varustettu muuntaja kyllästyy $100A \cdot 25$ virralla (nimellistaakalla), eli 2500 ampeerilla. Tarkkuusrajakertoimen jälkeen ilmoitetaan toisiotaakka. Toisiotaakalla ilmoitetaan, kuinka suurella toisiotaakalla muuntaja on suunniteltu toimivaksi. Muuntajan täydellinen tyyppimerkintä on siis esimerkiksi muotoa 100/5 5P25 10VA. (Vihavainen 2016, 19). Elovaara ja Laiho (1988, 272–275) jakavat mittamuuntajat kahteen eri pääryhmään: jännite- ja virtamuuntajiin. Suojausta suunniteltaessa on tärkeää muistaa, että mittamuuntajissa on kahden eri tyylin toisiokäämityksiä: suojaukseen suunniteltuja käämityksiä ja mittaukseen suunniteltuja käämityksiä. Suojaukseen ja mittaukseen suunnitelluilla käämityksillä erona on se, että suojauskäämitykset pysyvät mittaamaan myös mittamuuntajan nimellistä suurempia suureita.

Maasulkusuojauksen toimintaan tarvittavat mitattavat suureet ovat maasulkuvirta (nollavirta) I_0 eli vaihevirtojen summa, sekä nollajännite U_0 eli verkon tähtipisteen ja maan välinen jännite. (Lakervi & Partanen 2008, 190–191)

2.5.1 Maasulkuvirran mittaaminen

Maakaapeloidun maasta erotetun tai kompensoidun verkon maasulkuvirran mittaaminen on haastavaa. Mitattava virta maasulun aikana voi olla suurimmillaan tuhansia ampeereita (kaksoismaasulku tai katkeilevan vian transientit), ja pienimmillään vain muutamia ampeereita tai jopa alle, kun halutaan havaita suuren impedanssin vikoja. Tällöin virtamuuntajan valinnassa pitää varmistaa, ettei muuntaja kyllästy suurilla virroilla, mutta että se on tarkka myös pienillä virroilla. Jotta nimellistä suuremmat vikavirrat saadaan toistettua ilman kyllästymistä, käytetään suojaukseen

tarkoitettuja virtamuuntajia. Kompensoidussa kaapeliverkossa maasulkuvirta on hyvin pieni, jolloin virtamuuntajalta vaaditaan tarkkaa toimintaa myös mittausalueen alkupäässä. Normaalisti kompensoidun verkon maasulkuvirrat ovat korkeimmillaankin vain muutamien kymmenien ampeerien suuruusluokkaa. On myös huomioitava, että suojauksen käyttämä nollavirran resistiivinen osa on tavallisesti vain joitain ampeereita. (Wahlroos, Altonen & Vano 2017, 1–5)

Wahlroosin ja Altosen (2017, 22–23) mukaan virtamuuntajien summakytkennän, eli niin sanotun Holmgreenin kytkennän käyttäminen ei sovellu maasulkuvirran mittaamiseen kompensoiduissa verkoissa kovinkaan hyvin. Vaihevirroista lasketun summaavirran mittaustarkkuuteen vaikuttavat ensinnäkin jokaisen yksittäisen vaihevirtamuuntajan arvot, jotka eivät koskaan ole täysin identtiset. Tästä syntyy hieman epätarkkuutta mitattuun nollavirtaan, eli ns. näennäistä nollavirtaa. Toinen merkittävä haittapuoli vaihevirtamuuntajien summakytkennän käyttämisessä on esimerkiksi suuret kytkentävirtasysäykset ja suurivirtaiset oikosulut, jotka voivat kyllästyä vaihevirtamuuntajan hetkellisesti. Yhden vaiheen virtamuuntajan kyllästyminen johtaa näennäisen nollavirran syntymiseen. Virtamuuntajan kyllästyminen on suurin ongelma ajatellen summakytkennän käyttämistä nollavirran mittaamiseen. Näennäinen nollavirta aiheuttaa käytännössä vääriä suojauksen havahtumisia ja kasvattaa riskiä virheellisiin irtikytkentöihin.

Yleensä maasulkusuojaukseen maasta erotetuissa ja kompensoiduissa verkoissa valitaankin kaapelivirtamuuntaja. Kaapelivirtamuuntaja sijoitetaan kaikkien kolmen vaihejohtimen ympärille, jolloin mittaus on suoraan vaihevirtojen osoitinsumma. Kaapelivirtamuuntaja ei vaikuta verkossa esiintyvistä kytkentävirtasysäyksistä, koska vaihevirtojen summa on nolla kaikissa muissa tilanteissa kuin maasulussa. (Lehesvuo 2018)

Mittausalueeksi valitaan esimerkiksi 100/1A tai 70/1A -virtamuuntaja tarkkuusluokassa 5P (Wahlroos & Altonen 2017, 19–20). Tämä tarkoittaa käytännössä, että virtavirhe on 1 prosentti ja kulmavirhe 1 aste, kuten alla olevassa taulukossa 3 on vihreällä korostettu. Tarkkuusluokalle 5P virheet kuitenkin ilmoitetaan vain nimellisellä virralla ja taajuudella mitatulle virralla (taulukossa korostettu keltaisella). Siten esimerkiksi viidellä ampeerilla mitatun virran ja kulman virhe voi olla paljon suurempi.

Tästä syystä suojausta koestaessa on tärkeä testata virtamuuntajan tarkkuus pienillä virroilla, mikäli valmistaja ei erikseen ilmoita tarkkuutta niille (Lehesvuo 2018).

Taulukko 3: Erään virtamuuntajan testiraportti (SLT-Consults 2018)

Tarkkuus testi:					
Arvo	100/1	Taakka	1VA	Luokka	5P
Mitattu 100% nimellisellä taakalla					
Nimellinen %	Todellinen %	Virhe %	Raja	kulmavirhe asteina	Raja
100	100,1	-0,108	1	0,70989	1

Suojaustarkoitukseen valmistettujen virtamuuntajien kulmavirheen raja-arvoja alle nimellisillä arvoilla ei määritetä missään virtamuuntajia koskevassa standardissa.

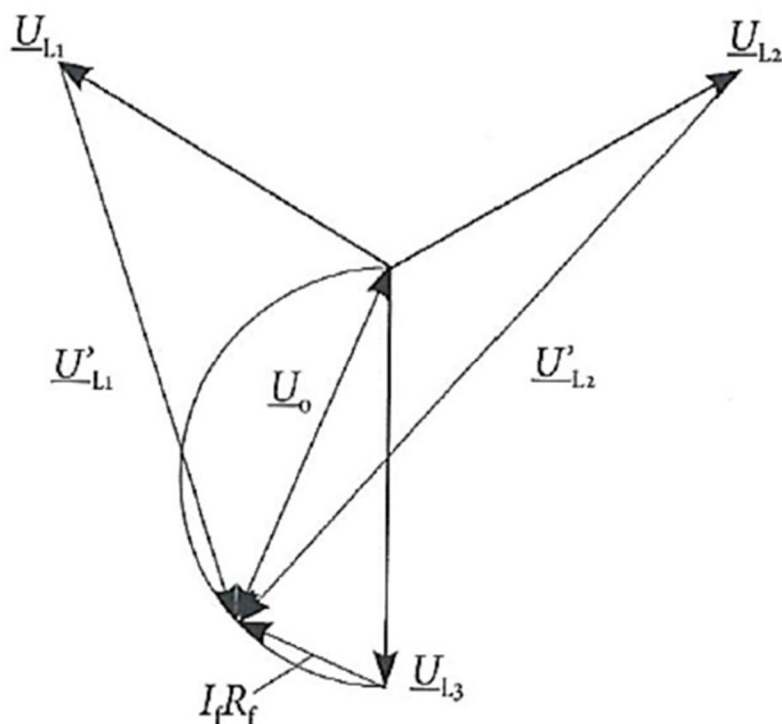
Asiaan on pyritty etsimään ratkaisua ja tästä syystä ABB teki aiheesta tutkimuksen (Wahlroos ym. 2017), jonka avulla halutaan saada aikaiseksi muutos standardiin virtamuuntajien mittaustarkkuuden osalta.

Wahlroos ym. (2017, 3) toteavat, että tällä hetkellä virtamuuntajia on kuitenkin saatavilla laajennetulla suojausalueella (suojaus- plus mittausluokka), jolloin taataan muuntajan tarkkuus myös pienillä virroilla. Tällaiset nk. yhdistetyn luokan virtamuuntajat ovat kalliimpia, mutta myös niistä saatava hyöty on suurempi. Yleisesti niitä ei kuitenkaan käytetä, koska mikään standardi ei määritä niitä pakolliseksi, eivätkä tilaajat aina osaa vaatia niitä käytettäväksi. ABB suosittelee käyttämään maasulkusuojaukseen yhdistettyjä mittaus- ja suojausluokan kaapelivirtamuuntajia.

Wahlroos ym. mukaan ABB:n valmistamilla yhdistetyn luokan (engl. *combi-class*) muuntajilla tarkkuusluokan yhteydessä käytettävät lisämerkinnät voivat olla esimerkiksi 0.2S tai 0.5S. Virtamuuntajan tyyppi on siten esimerkiksi 0.2S/5P25. Tällaiselle muuntajalle taataan toimintatarkkuus prosenttiin nimellisistä arvoista. Esimerkiksi 0.2S/5P25 muuntosuhteella 100/1A täyttää samanaikaisesti 0.2S -mittausluokan sekä 5P -suojausluokan standardin mukaiset tarkkuudet.

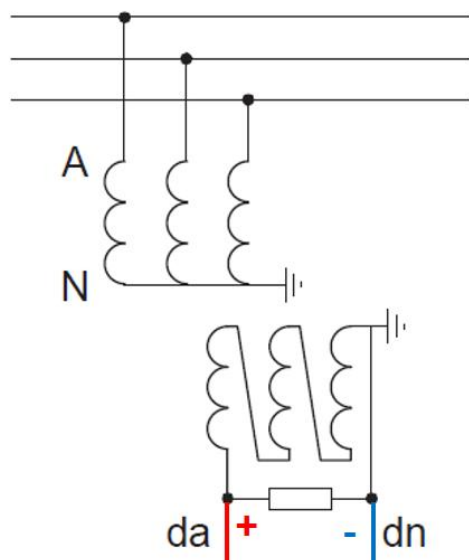
2.5.2 Nollajännitteen mittaaminen

Nollajännite (U_0) on verkon tähtipisteen ja maan välinen jännite. Nollajännitettä mitataan jännitemuuntajien ns. avokolmio-kytkennällä. Verkon nollajännite voi vaihdella vaihejännitteen ja nollan välillä, jolloin jännitemuuntajat on suunniteltava toimimaan koko jännitealueella. Verkon terveessä tilassa nollajännite on lähellä nollaa voltia (symmetrisissä verkoissa; verkon vaihe-maa -admittanssien samanlaisuus määrää tarkan arvon) ja suorassa maasulussa ($R_f = 0 \text{ ohm}$) nollajännite on vaihejännitteen suuruinen. Nollajännitteen (U_0) muodostumista vaihejänniteosoittimien summana vaiheen L3-maasulussa on havainnollistettu kuviossa 4. Nollajännitteen osoitin U_0 piirtää vikaresistanssin funktiona puoliympyrän. Täysin vikaresistanssittomassa maasulussa nollajännite saavuttaa vaihejännitteen suuruuden. Viallisen vaiheen jännite, UL_3 , tippuu suorassa maasulussa nollaan. Maasulku vaikuttaa myös terveisiin vaihejännitteisiin UL_1 ja UL_2 . Ne nousevat pääjännitteen suuruiseksi täysin vikaresistanssittomassa maasulussa. On huomattava, että maasulku ei kuitenkaan vaikuta verkon pääjännitteisiin, joihin kuormat on kytketty. (Lakervi & Partanen 2008, 186)



Kuvio 4. Nollajännite vikaresistanssillisessa maasulussa (Lakervi & Partanen 2008, 18)

Avokolmiokäämitys tarkoittaa käytännössä sitä, että vaihejännitemuuntajien tertiäärikäämit kytketään sarjaan. Avokolmiokäämitys on esitetty kuviossa 5. Nollajännite mitataan sarjan päiden väliltä (da-dn kuviossa). Sarjan päiden välille laitetaan aina kippivärähtelyä vaimentava vastus, jolla estetään jännitemuuntajan kippivärähtely. (TTT-käsikirja 2000, 13). Avokolmiokäämityksen tarkkuudelle on annettu minimivaatimuksiksi suojaukseen vaadittava luokka 3P tai 6P. Luokassa 6P jännitevirhe on 6 prosenttia ja kulmavirhe 4 astetta. Jännitemuuntajat mitoitetaan tavallisesti siten, että suorassa maasulussa nollajännitteen ensiöarvon ollessa vaihejännitteen suuruinen on avokolmiokäämistä mitattavan nollajännitteen arvo 100 voltia. (Elovaara & Laiho 1988, 281–282)



Kuvio 5. Nollajännitteen mittaaminen avokolmiosta (Wahlroos 2018a, 74)

2.6 Suojareleet

Suojareleen tehtävänä on havaita viat ja epänormaalit tilanteet sähkönjakeluverkossa ja poistaa ne tarpeellisella nopeudella ja selektiivisyydellä. Tehtävä suoritetaan mittamuuntajilla mittaamalla ja siten valvomalla sähköverkon toimintaa. (Elovaara & Haarla 2011, 335). Nykyisin, puhuttaessa uusista asennettavista suojareleistä, tarkoitetaan käytännössä mikroprosessorilla varustettua suojarelettä, joka kommunikoi ja lähettää tietoa esimerkiksi käytöntukijärjestelmään. Releet toimivat digitaalisesti ja niiden suojausfunktiot ovat monimutkaisempia ja parempia kuin staattisilla releillä. (Mörskyä 1992 lainaten Tulomäki 2017, 4)

3 Maasulkuvikojen suojausfunktiot

Maasulkusuojauksen tehtävänä on kytkeä maasulkuviat irti verkosta mahdollisimman nopeasti ja selektiivisesti. Nopeudella pyritään rajoittamaan kosketusjännitteiden vaikutusajan kestoa ja selektiivisyydellä parantamaan sähkönjakelun varmuutta. Maasulkusuojausta koskevissa laeissa ja määräyksissä määritetään vaatimukset maasulkusuojaukselle. Maasulun suojalaitteen on toimittava enintään 500 ohmin maasulussa, mikäli maasulku tapahtuu suojamaadoittamattomassa verkon osassa. Suositus on kuitenkin, että suojaus toimii niin suurella resistanssilla kuin teknisesti ja kohtuullisilla kustannuksilla mahdollista. Lisäksi yksivaiheisen maasulun

kosketusjännite ei saa ylittää suurinta sallittua arvoa, mikäli alueella liikkuu usein ihmisiä. (TTT-käsikirja, 8.3.1)

Maasulkusuojiin toiminta perustuu tavallisimmin perustaajuisen tähtipistejännitteen, vaihejännitteiden tai summavirran muutokseen maasulun vaikutuksesta. Lisäksi maasulun havaitsemiseen voidaan käyttää jännitteen ja virran yliaaltoja, sekä suuritaajuuksisia muutosvirtoja, jotka syntyvät maasulun alussa viallisen vaihejohtimen maakapasitanssin purkautuessa ja terveiden vaiheiden maakapasitanssien varautuessa. (Lakervi & Partanen 2008, 190)

Käytännössä maasulkusuojaus maasta erotetuissa ja kompensoiduissa verkoissa toteutetaan käyttämällä suunnattuja maasulkureleitä. Suunnattu suojaus tarkoittaa sitä, että viallinen lähtö pystytään paikallistamaan maasulkuvirran ja maasulkujännitteen kulmien erosta. (Lakervi & Partanen 2008, 192). Viallisella lähdöllä maasulkuvirran ja nollajännitteen välinen vaihekulmaero maasta erotetussa verkossa on 90° . Sammutetussa verkossa kulma muuttuu kompensointiasteesta riippuen. Tästä syystä sammutetussa verkossa suunnatun maasulkusuojan toimintasuureena käytetään nollavirran resistiivisen komponentin mittaamista, koska se ei vaikuta sammutuskelan kompensointiasteesta. Resisttiivistä virtaa yleensä kasvatetaan kompensointikelan rinnakkaisvastuksella. (Mörskyä 1992 lainaten Pesonen 2015, 22)

Maasulkusuojaus kompensoiduissa verkoissa toteutetaan yleensä yhdistelemällä eri periaatteella toimivia suoja toisiinsa. Esimerkiksi perustaajuisen jännitteen ja virran mittaamisella saavutetaan suuri herkkyys, kun taas huippuarvoja mittaamalla suuri toimintanopeus. Suojauksen aukottomuuden, nopeuden ja herkkyyden saavuttamiseksi suojaukseen tehdään useampia eri porrastuksia. (TTT-käsikirja 2000, 13-16). Suojauksen porrastusta käsitellään tarkemmin luvussa 4.1.

Wahlroosin (2016) mukaan tällä hetkellä maasulkusuojauksen suurimpana haasteena on löytää optimi suojauksen herkkyyden ja selektiivisyyden välillä. Herkkyydellä halutaan pienentää verkon maasulkuvioista aiheutuvia vahinkoja ja mahdollisesti ennaltaehkäistä kuluttajille syntyviä sähkönjakelun häiriöitä. Herkällä maasulkusuojauksella voidaan pienentää maasulkujen aiheuttamia vahinkoja. Mitä aiemmin verkossa olevat viat huomataan, sitä suuremmalla todennäköisyydellä ne ehdi-

tään korjaamaan ennen kuin ne aiheuttavat mittavia tuhoja. Herkkä maasulkusuojaus kompensoidussa verkossa perustuu tavallisesti resistiivisen maasulkuvirran mittaamiseen. Kuten yllä on mainittu, suurin osa resistiivisestä maasulkuvirrasta luodaan kompensointikelan rinnalla olevan vastuksen avulla. Maasulussa resistiivinen virta kulkee vikapaikkaan viallisen lähdön suojareleen mittauksen lävitse, jolloin virran suunnan määrittäminen onnistuu.

Perustaajuisen jännitteen ja virran mittaaminen katkeilevissa maasulkuvioissa ei välttämättä toimi halutulla tavalla, koska katkeilevien maasulkuvikojen jännitteet ja virrat eivät ole perustaajuuden mukaisia. Suurten virtatransienttien ja ajallisen epä säännöllisyyden vuoksi katkeilevien maasulkuvikojen jännitteet ja virrat voivat erota perustaajuudesta huomattavissa määrin. Kuten jo kompensointia käsittelevässä kappaleessa on mainittu, ei maasulun kompensointikaan toimi kuin perustaajuudella. Perustaajuista maasulkuvirtaa rajoitetaan siis kompensointilaitteistolla, mutta yliaaltainen maasulkuvirta kulkee rajoittamattomana vikapaikkaan. Tästä seuraa se, että katkeilevan maasulun aiheuttama vikavirta sisältää suhteellisesti todella paljon ei-sinimäistä virtaa. Tämä aiheuttaa sen, että perustaajuudella toimivat suojauslohkot eivät välttämättä huomaa kyseisen kaltaista jäännösvirtaa. Lisäksi yliaaltojen mukana kulkeva virta voi näkyä perustaajuisella suojalla siten, että se tulkitsee vian suunnan väärin. Väärin tulkittu suunta voi aiheuttaa väärän suojan toimimisen ja terveen lähdön poiskytkemisen verkosta. (Wahlroos 2018a, 93, 95, 103)

Yllä mainituista seikoista voidaan päätellä, että katkeilevissa maasuluissa perinteisten suojausfunktioiden käyttäminen voi johtaa erilaisiin ongelmiin, joista voidaan mainita seuraavat kolme esimerkkiä. Ensimmäinen ja todennäköisin ongelma on se, että vikaa ei saada poistettua verkosta nollavirran perustaajuisen osoittimen heilahdellun seurauksena. Todennäköisesti seurauksena on varasuojan toiminta, jolloin varasuoja irrottaa koko sähköaseman verkosta. Varasuojana perinteisesti käytetään pelkkää Uo-suojaa hieman pidemmällä laukaisuviiveellä. Katkeilevassa maasulussa normaalisti Uo nousee riittävän suureksi ja aiheuttaa irti kytkemisen. Toinen mahdollinen ongelma on seurausta siitä, että varasuoja ei toimi, eikä lähtöä saada kytkettyä irti verkosta, jolloin on mahdollista, että viasta kehittyy kaksi- tai kolmivaiheinen oikosulku. Kolmas tyypillinen ongelma on terveen lähdön irtikytkeminen ver-

kosta. Tämä johtuu virran perustaajuuden osoittimen heilahtelusta, jolloin nollavirran osoitin voi kääntyä terveellä lähdöllä toiminta-alueelle ja saada aikaan virheellisiä havahtumisia ja jopa virheellisiä lähdön irrottamisia verkosta.

3.1 Monitaajuusadmittanssisuoja

Syynä monitaajuusadmittanssisuojauksen kehittämiseksi voidaan Wahlroosin (2018a) mukaan pitää jo pidemmän aikaa vallinneita katkeilevien maasulkujen yleistymiseen liittyviä ongelmia maasulkuvikojen havaitsemisessa ja poiskytkenäissä. Lisäksi perinteisesti erityyppisille maasulkuvioille on aina valittava eri toimintaperiaatteella toimivat suojat. Aiemmin ei ole ollut yhtä sellaista tapaa, joka olisi yleispätevä kaikentyyppisiin maasulkuvikoihin. Monitaajuusadmittanssisuojan kehittämisen tavoitteena on ollut yhdistää kaikkien aiemmin tunnettujen maasulkusuojiin parhaat osat ja saada aikaiseksi yksi suoja, joka kattaa kaikentyyppiset maasulkuviat. Suojauksen toiminta-arvojen asetteleminen haluttiin saada yksinkertaiseksi ja sellaiseksi, että perinteisillä verkon mallintamisilla pystytään suoja ottamaan luotettavasti käyttöön. Lisäksi suojauksella pitää pystyä luotettavasti havaitsemaan ja irrottamaan verkosta kaikentyyppiset maasulkuviat. Tämä helpottaa huomattavasti suojauksen suunnittelua, asettelemista ja koestamista. Tässä osiossa käsitellään monitaajuusadmittanssisuojauksen toimintaa ja hieman vertaillaan sitä nykyisiin yleisesti käytössä oleviin suojiin.

Admittanssi on impedanssin käänteisluku. Admittanssin SI-yksikkö on Siemens (S). Admittanssin tunnuksena käytetään yleisesti merkintää Y . Admittanssi koostuu impedanssin (Z) tavoin sekä reaali-osasta että imaginääriosasta. Impedanssin reaali-osan ollessa resistanssi, on se admittanssille konduktanssi (G). Impedanssin imaginääriosaa on reaktanssi, joka vastaavasti admittanssilla on suspektanssi (B). Maasulkulaskennassa admittanssilaskennassa käytetään nollavirtaa ja nollajännitettä. Tällöin konduktanssin tunnus on G ja suspektanssin tunnus on B . Kaavoissa 4-7 on esitetty kaavat admittanssin määrittämiseksi. (Wahlroos & Altonen 2011, 1–2)

$$Y = \frac{1}{Z} \quad (4)$$

$$Y = G + j \cdot B \quad (5)$$

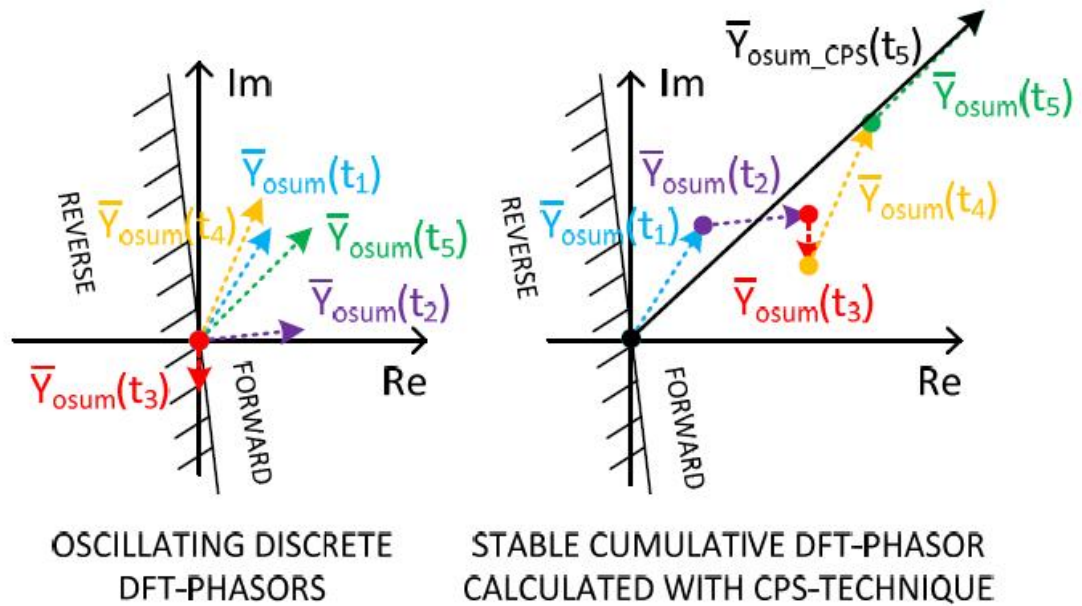
$$Y = \frac{I}{U} \quad (6)$$

$$\bar{Y}_0 = \frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} = G_0 + j \cdot B_0 \quad (7)$$

Admittanssiin perustuvissa maasulkusuojissa mitattu kulma tai admittanssin arvo eivät muutu vikaresistanssin kasvaessa. Maasulussa mitattu nollavirta ja nollajännite pienenevät samassa suhteessa vikaresistanssin kasvaessa. Tällöin niiden suhde, eli mitattu admittanssin arvo, säilyy vakiona. Maasulkulaskennassa laskut lasketaan pääosin vektoreina, joita merkitään tunnuksen yläpuolella olevalla viivalla. (Wahlroos 2018a)

3.1.1 Kumulatiivinen vektorisumma

Analoginen signaali muutetaan digitaaliseksi ottamalla siitä haluttu määrä näytteitä. Näytteiden perusteella pystytään mallintamaan analoginen signaali suhteellisen tarkasti, riippuen luonnollisesti näytteenottotaajuudesta. Signaalin näytteistykseen jälkeen sille tehdään diskreetti Fourierin muunnos (DFT), jonka tuloksena saadaan tietoon osoitin, jolla on tietty amplitudi ja kulma. (Romppainen 2016). Kuviossa 6 on esitelty DFT-osoittimien käyttöä CPS-laskennassa.



Kuvio 6. CPS-laskenta (Wahlroos & Altonen 2014, 3)

CPS-laskennassa (*Cumulative Phasor Summing*) lasketaan diskreetistä Fourierin muunnoksesta (kuvassa vasemmalla) saadut (poikittais)admittanssivektorit kumulatiivisesti yhteen aikavälillä $t_{\text{alku}}-t_{\text{loppu}}$ (kuvassa oikealla). CPS-laskennalla saadaan siis suodatettua pois katkeilevan maasulun aiheuttaman DFT-osoittimien heilahtelua ja lasketusta maasulun suunnasta tulee näin todenmukaisempi. Laskennan etuna on, että sitä voidaan käyttää kaikenlaisissa maasulkutilanteissa. Siitä saatu tulos on tarkka myös perustaajuuden admittansseilla ja suurilla vikaimpedansseilla. (Wahlroos & Altonen 2014, 3–5). Voidaan sanoa, että vian suunnan määrittäminen CPS-laskennalla on suurin parannus mitä vian suunnan tulkintaan on tehty viime vuosina.

Sen lisäksi että CPS-laskentaa käytetään vian suunnan määrittämiseen, lasketaan myös kumulatiivinen summa maasulkuvirrasta ja maasulkujännitteestä, jolloin niiden suhteen tulokseksi saadaan stabiloitu arvo admittanssille kaavan 8 mukaisesti. (Wahlroos & Altonen 2017, 34)

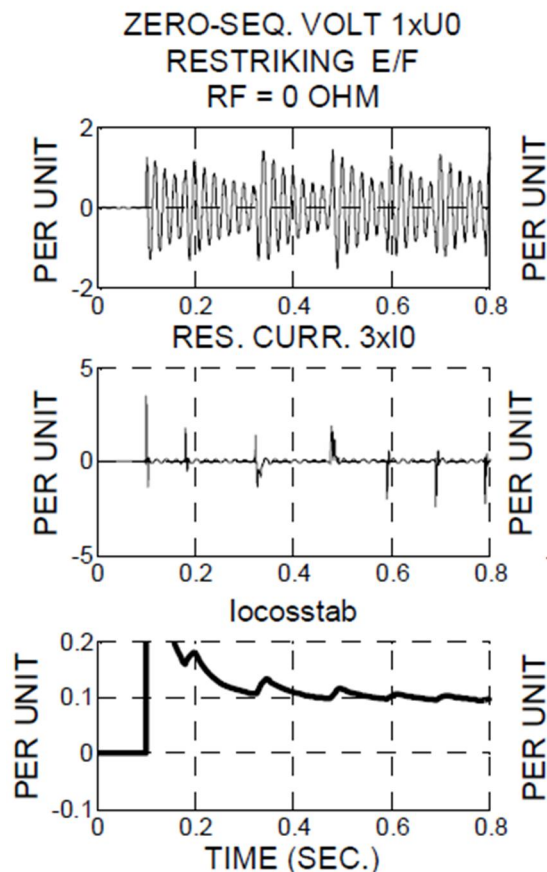
$$\bar{Y}_{o \text{ stab}}^1 = \frac{\bar{I}_{o \text{ CPS}}^1}{-\bar{U}_{o \text{ CPS}}^1} = G_{\text{ostab}} + j \cdot B_{\text{ostab}} \quad (8)$$

CPS-laskennan perusteella saatu stabiloitu admittanssiarvo (stabiloitu estimaatti, ks. kaava 8) antaa hyvän lähtökohdan viallisen lähdön tunnistamiseen katkeilevan maasulun aikana. Kun stabiloitu admittanssiarvo kerrotaan verkon vaihejännitteellä, tulokseksi saadaan virta-arvo, joka kuvaa maasulkuvirran laskennallista arvoa

(kaava 9). Jännitteenä käytetään verkon nimellistä vaihejännitettä, koska katkeileva maasulku on yleensä jäykkä (vikavastukseton) maasulku kaapelin vaipan ja johtimen välillä, jolloin nollajännite nousee vaihejännitteen suuruiseksi. Tällöin voidaan olettaa, että kertominen vastaa todennäköisesti todellista vian jännitettä riittävällä tarkkuudella. (Wahlroos & Altonen 2017, 34)

$$\bar{I}_{0\text{stab}}^1 = (G_{\text{ostab}} + j \cdot B_{\text{ostab}}) \cdot U_{\text{PE}} \quad (9)$$

Stabiloidun laskennallisen virran perusteella katkeilevaa maasulkua voidaan mallintaa jatkuvana maasulkuna, jolloin vian poiskytkeminen onnistuu samoilla ehdoilla kuin jatkuvan maasulun vian poiskytkeminen. Tämä on esitetty kuviossa 7. Tämä helpottaa suojauksen asettelua ja koestamista. Tässä tapauksessa laskenta on suoritettu resistiivisen virran perusteella. (Wahlroos & Altonen 2017, 34)



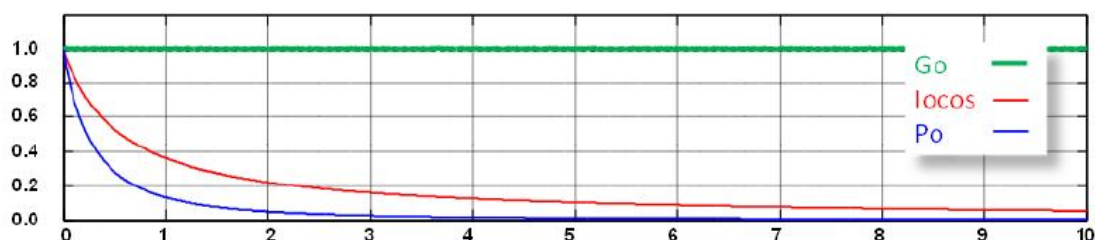
Kuvio 7. CPS-laskennan perusteella saatu "stabiloitu" resistiivisen maasulkuvirran arvo katkeilevan maasulun aikana (Wahlroos & Altonen 2017, 34)

Monitaajuusadmittanssisuojan havahtuminen asetellaan nollajännitteen avulla. Nollajännitteen ylittäessä asetellun arvon suoja havahtuu, jonka jälkeen viallinen

lähtö kytketään irti verkosta laukaisuaajan päättymisen jälkeen, mikäli vika ei ole poistunut. Katkeilevien maasulkujen takia suojalle asetellaan ns. resetointiaikaviive, joka pitää suojan havahtuneena, vaikka nollajännite ja nollavirta laskevat katkeilevan maasulun katkojen välillä lähelle nollaa. Muutoin suoja palautuisi jokaisen transientin jälkeen, eikä laukaisua välttämättä koskaan tapahtuisi. Resetointiaikaviiveksi valitaan katkeilevan maasulun aiheuttamien virtapiikkien pisin mahdollinen oletettu väli, tyypillisesti esimerkiksi 500ms. (630 series technical manual 2014, 517)

3.1.2 Erilaisten suojausfunktioiden vertailua

Kuviossa 8 on verrattu erilaisten maasulun laskentatapojen suhdetta vikaresistanssin kasvuun. Vaaka-akselilla on vikaresistanssi kilo-ohmeina. Pystyakseli kuvaa eri suojien toimintasuureen suuruutta suhteellisena arvona (*per unit*). Tarkoituksena on havainnollistaa admittanssin mittauksella saavutettavia etuja. Herkkä maasulkusuojaus kompensoidussa verkossa perustuu maasulkuvirran resistiivisen komponentin laskemiseen, jonka takia kuviossa 8 on tarkasteltu eri menetelmien resistiivisiä toimintasuureita. (Wahlroos & Altonen 2017, 15)



Kuvio 8. Maasulun laskentakaavojen erot: toimintasuureen vaikuttuminen vikavastuksen suuruudesta viallisella lähdöllä (Wahlroos & Altonen 2017, 15)

Kuviosta 8 nähdään, että P_o eli maasulun pätöteho on selvästi huonoin toimintasuureista, jos verrataan suurella resistanssilla tapahtuvaa maasulkua, koska sekä nollajännite että nollavirta pienenevät vikaresistanssin kasvaessa. Tällöin niiden tulo menee siis entistä pienemmäksi vikavastuksen kasvaessa. Tästä johtuen suurella resistanssilla viallisen ja terveen lähdön toimintasuureiden välinen ero on erittäin pieni, mikä vaikeuttaa vian suunnan tulkintaa. Maasulun pätöteho lasketaan maasulkujännitteen, -virran ja niiden välisen kulman kosinin tulona, kuten kaavassa 10 on esitetty. Maasulkujännite ja -virta ovat laskuissa itseisarvoina, eli etumerkit-

töminä. Maasulkutehoon perustuvalla maasulkusuojalla ei päästä parhaaseen mahdolliseen herkkyyteen verrattuna virtaan tai admittanssiin perustuviin maasulkusuojiin. (Wahlroos & Altonen 2017, 15)

$$P_0 = I_0 \cdot U_0 \cdot \cos \varphi \quad (10)$$

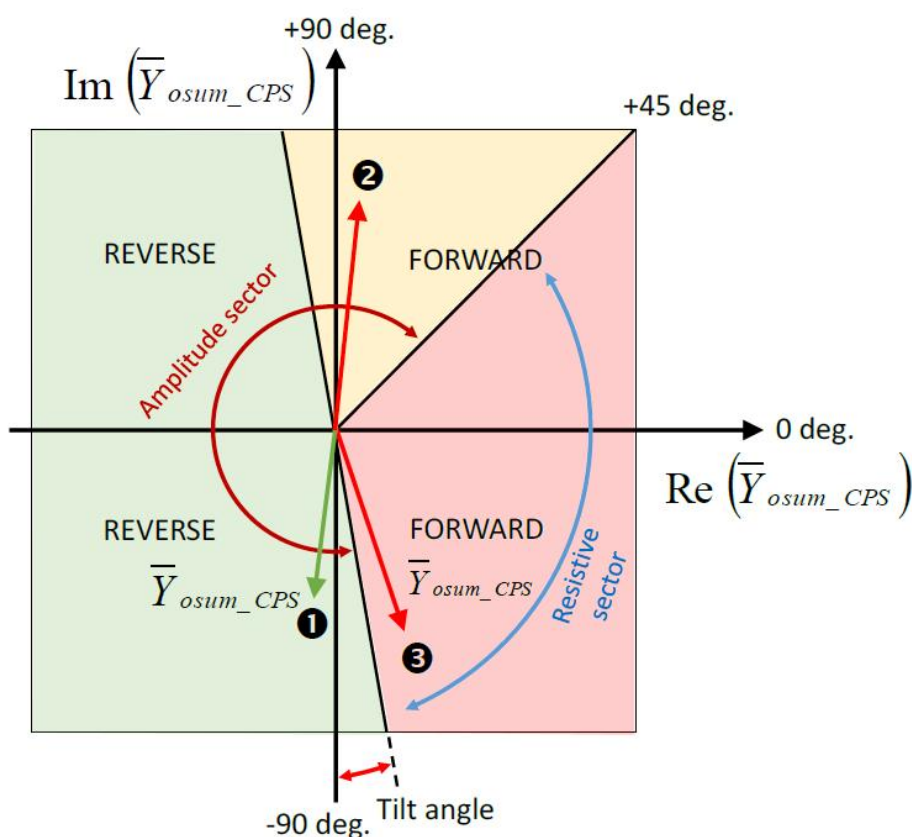
$I_0 \cos$ on resistiivisen virran perusteella toimiva suunnattu maasulkusuojausfunktio. Resisttiivinen virta saadaan laskettua matemaattisesti kertomalla nollavirran amplitudi, nollajännitteen ja virran kulmaeron cosini-funktiolla (ks. kaava 11). Kuten kuviossa 8 voidaan havaita, resistiivinen virta vaikuttaa vähemmän vikavastuksen kasvamisesta kuin maasulkutehoon perustuva suojaus. locos-suoja ei kuitenkaan huomioi nollajännitteen pienenemistä, vaan suojan toimintasuure perustuu suoraan virran pätökomponentin suuruuteen. Suojan herkkyys siis määritellään nollavirran pätökomponentin suuruudella. (Wahlroos & Altonen 2017, 15)

$$I_0 \cos = I_0 \cdot \cos \varphi \quad (11)$$

Wahlroos ja Altonen (2017, 12-15) toteavat, että G_0 on perustaajuuden (nolla)admittanssin reaaliosan laskentaan perustuva suojausfunktio. Admittanssin reaaliosa, eli konduktanssi (G_0) saadaan laskettua ottamalla reaaliosa maasulkuvirran ja -jännitteen perustaajusten osoittimien osamäärästä (ks. Kaava 5). Wahlroosin ja Altonen mukaan sama periaate pätee myös monitaajuusadmittanssisuojausfunktion toimintaan. Laskennassa otetaan huomioon jännitteen ja virran pieneneminen, joten tulos on aina sama vikaresistanssista riippumatta. Viallisen ja terveeseen lähdön tulokset ovat selvästi erilaiset, mikä tekee funktiosta tarkemman kuin virtaan perustuva suojausfunktio. Tämä helpottaa suojan asettelua, sekä antaa selvän tuloksen vian poiskytkentää varten. Suojan havahtumisen määrittää nollajännitteen nouseminen maasulkuviassa kuten tavallisesti kaikissa suunnatuissa maasulkusuojissa.

Kuviossa 9 on esitetty monitaajuusadmittanssisuojan toimintasektori. On hyvä huomioda, että koska vain perustaajuuden mukaista maasulkuvirtaa kompensoidaan, on yliaalloista mitatun virran kulma sama kuin kompensoimattoman maasulkuvirran kulma. Tällöin yliaalloista mitattu monitaajuusadmittanssisuojan suuntaosoittimen kulma on päinvastainen terveellä ja viallisella lähdöllä (ks. kuvio 9), kuten maasta erotetussa verkossa. Numerolla 2 merkitty vektori kuvaa sekä maasta erotetun verkon että yliaalloista mitatun kumulatiivisen vektorisumman kautta lasketun

monitaajuisen admittanssivektorin kulmaa viallisella lähdöllä. Tätä sektoria toimintakarakteristikassa kuvataan nimellä amplitudisektori (*amplitude sector*). Suoja siis havaitsee myös maasta erotetun verkon viat. Numerolla 1 merkitty kumulatiivisen vektorisumman kautta laskettu monitaajuinen admittanssivektori kuvaa tervettä lähtöä, jonka suunta on vastakkainen vektorin 2 suuntaan nähden. Numerolla 3 merkitty kumulatiivisen vektorisumman kautta laskettu monitaajuinen admittanssivektori kuvaa kompensoidun verkon viallisen lähdön suuntaaosoitinta suurempiohmisessa viassa. Tällöin harmonisten yliaaltojen vaikutusta ei ole ja suuntaaosoittimen kulman määrää vikavirran resistiivinen komponentti, sekä taustaverkon syöttämän virran loiskomponentti. Tätä sektoria toimintakarakteristikassa kuvataan nimellä resistiivinen sektori (*resistive sector*). Mikäli mitattu kumulatiivisen vektorisumman kautta laskettu monitaajuinen admittanssivektori on resistiivisessä sektorissa, tällöin stabiloidun virtaestimaatin resistiivistä komponenttia verrataan minimi toimintavirta -asetteluun (vrt. Kaava 9). Mikäli kumulatiivisen vektorisumman kautta laskettu monitaajuinen admittanssivektori on amplitudisektorissa, tällöin stabiloidun virtaestimaatin amplitudia verrataan minimi toimintavirta -asetteluun (vrt. Kaava 8). (Wahlroos & Altonen 2017, 35)



Kuvio 9. Monitaajusadmittanssisuojan toimintaperiaate kuvitettuna (Wahlroos & Altonen 2017, 35)

3.1.3 Monitaajusadmittanssi verrattuna perinteisempiin funktioihin

Monitaajusadmittanssisuoja on mielestäni tämänhetkisen tiedon perusteella herkkydeltään paras, mitä nykYTEknologialla on mahdollista saavuttaa. Suojauksessa käytettävä CPS-laskenta mahdollistaa katkeilevien maasulkuvikojen parhaan saatavissa olevan suojauksen. Lisäksi suojaus on aseteltavissa samojen verkon parametrien perusteella kuin perinteiset suojat asetellaan. Tämä tuo kaivattua selkeyttä maasulkusuojaamisen suunnitteluun ja toteuttamiseen. Lisäksi sama suojausfunktio toimii kaiken tyyppisille maasulkuvioille ja näin ollen helpottaa suojauskonfiguraation tekemistä.

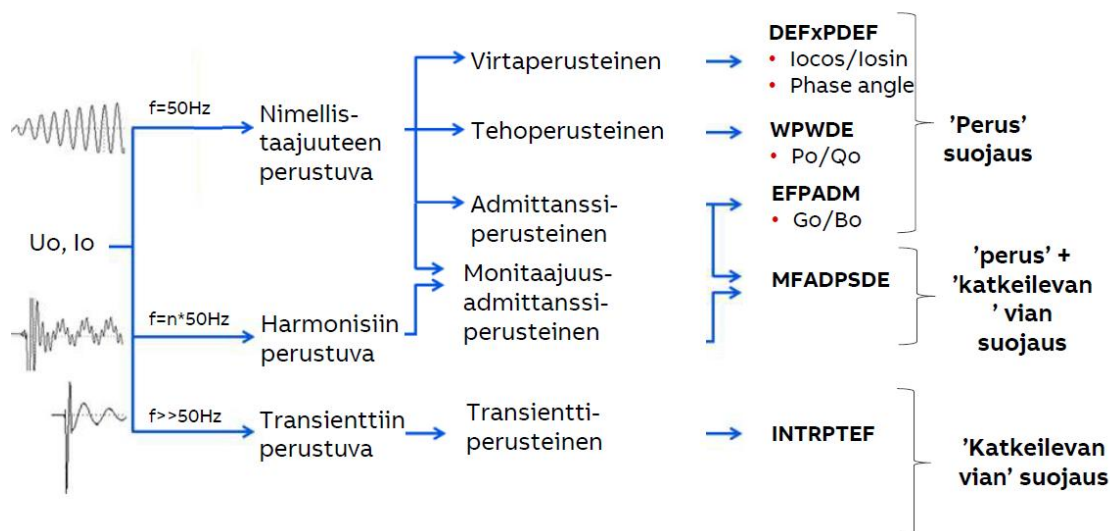
4 Maasulun suojausasettelut

Maasulun suojausasetteluissa tulee huomioida ainakin seuraavat neljä asiaa. Ensinnäkin pitää valita sellaiset suojausfunktiot, joilla saadaan suojauduttua kaikilta vikatyypeiltä mahdollisimman aukottomasti. Toiseksi pitää pyrkiä luomaan selektiivinen

järjestelmä niiltä osin kuin on mahdollista: esimerkiksi kaksoismaasulkujen osalta täydellinen selektiivisyys voi olla mahdotonta saavuttaa. Kolmas tärkeä asia on herkkyys, eli se, kuinka käytössä olevalla laitteistolla saadaan herkin luotettavasti toimiva suojaus. Neljäs huomioitava asia on suojauksen yksinkertaisuus ja koestaminen. Mitä enemmän erilaisia suojausfunktioita käytetään, sitä haastavampaa koestamisesta ja suojien selektiivisestä asettelemisesta tulee. (Vihavainen 2018). Seuraavissa kappaleissa näitä neljää asiaa käydään tarkemmin läpi.

Suojausfunktion valintaan ei ole olemassa yhtä oikeaa tapaa, vaan kaikilla funktioilla on omat hyvät ja huonot puolensa. Monitaajuusadmittanssisuoja (MFADPSDE) on tässä poikkeava: suojalla pystytään havaitsemaan käytännössä kaikki erilaiset yksivaiheisina maasulkuina ilmenevät maasulun vikatyypit. MFADPSDE on IEC-61850 standardin mukainen lyhenne suojan englanninkielisestä nimestä *multi-frequency admittance-based earth-fault protection*. On tosin huomattava, että monitaajuusadmittanssisuojan käyttämisestä on vielä hyvin vähän käytännön kokemusta verrattuna muihin suojausfunktioihin. Suojaa on testattu kattavasti useissa eri verkoissa tehdyissä primäärimaasulkukokeissa, mutta suojan toimivuudesta käytännössä saadaan ajan myötä lisää kokemuksia. (Wahlroos 2018b)

Suojauksen aukottomuus saadaan käyttämällä pääsuojausta, jonka lisäksi valitaan varasuoja, joka toimii pääsuojan toiminnan estyessä jostakin syystä. Pääsuojan toiminnan estymisen syy voi olla esimerkiksi virtamuuntajan rikkoutuminen tai se, että suojarele sammuu kokonaan tai menee muutoin toimimattomaan tilaan (TTT-käsikirja 2000, 11–17). Kuviossa 10 on esitelty ABB:n suojareleissä käytettäviä suunnatun maasulunpääsuojaukseen käytettäviä suojausfunktioita. Kuvasta huomataan, että käytettäessä monitaajuusadmittanssisuojaa, erillistä katkeilevan vian suojaa ei tarvita.



Kuvio 10. Suojausfunktioiden toiminta (Wahlroos 2018a, 115)

ABB:n TTT-käsikirjassa (2000) mainitaan myös, että varasuojaukseen käytetään usein mittauskentästä mitattua nollajännitettä, jonka noustua asetellun rajan yli avataan syöttävä katkaisija. Tällöin varasuojan toiminta on riippumaton viallisen kentän suojareleen toiminnasta. Varasuojan toiminta ei ole tässä tapauksessa selektiivistä, vaan se katkaisee koko sähköjakelun asemalta. Samalla se kuitenkin estää tai ainakin rajoittaa vaarallisten kosketusjännitteiden syntymistä verkossa. On luonnollista, että turvallisuus on verkon selektiivistä toimintaa tärkeämpää. Varasuoja on nimensä mukaan tarkoitettu toimimaan tilanteessa, jossa pääsuojaus on vioittunut. Samalla aseman nollajännitteeseen perustuva varasuoja toimii sähköaseman kiskostoa suojaavana maasulkusuojana. Mikäli aseman kiskossa tapahtuu maasulku, eivät lähtöjen suunnatut maasulkusuojat huomaa tätä vikaa.

Suojauksen selektiivisyys saavutetaan pääsuojan asetteluilla. Selektiivisyys tarkoittaa sitä, että verkosta poistetaan vain vioittuneet verkon osat. Käytännössä tämä tarkoittaa siis vain viallisten lähtöjen irrottamista verkosta. Tämä toteutetaan valitsemalla eri asetteluryhmät vastaamaan verkon kytkentöjen tilaa, sekä porrastamalla jokainen asetteluryhmä erikseen. (TTT-käsikirja 2000, 12-15). Käytetään seuraavanlaista tapausta esimerkkinä havainnollistamaan suojaus kokonaisuutena: Asetteluryhmiä määritellään esimerkiksi seuraavien kriteerien mukaan: sammutettu verkko, maasta erotettu verkko ja tausta-asettelut. Tausta-asetteluilla tarkoitetaan yleensä sähköaseman varasyöttötilannetta, jossa oikosulkuvirrat pienenevät huomattavasti ja/tai maasulkuvirran arvo tai jakauma muuttuu normaalista. Tällöin

vaaditaan erilaiset asettelut esimerkiksi juuri oikosulkujen varalta. Asetteluryhmien määrittelyyn voidaan käyttää monia eri perusteita, jotka riippuvat aina kyseessä olevan aseman toiminnasta, päämuuntajien määrästä, sekä muista seikoista. Jokaiselle asetteluryhmälle täytyy asetella ja koestaa jokainen suojausfunktio erikseen käyttöönoton yhteydessä. Eri asetteluryhmillä voi kuitenkin olla samat suojausfunktiot ja asetteluarvot. Edellä mainitussa tapauksessa voisi olla neljä asetteluryhmää: sammutettu, maasta erotettu, sammutettu tausta-aseteltu ja maasta erotettu tausta-aseteltu ryhmä.

4.1 Maasulkusuojausten porrastus

Suojausfunktioiden porrastuksella pyritään parantamaan selektiivisyyttä, sekä täyttämään suojaukselta vaadittu nopea toiminta-aika ja herkkyys. Lisäksi annetaan esimerkiksi ohimeneville transienttimaasuluille hetki aikaa sammua itsestään. Porrastuksella sallitaan suojalle turvallisuuden asettamisessa rajoissa pidempi toiminta-aika, kun kyseessä ovat pienemmät vikasuureet. (TTT-käsikirja 2000, 15)

TTT-käsikirjan (2000, 15, 22-29) mukaan maasulkusuojaus voidaan toteuttaa esimerkiksi kolmella portaalla. Kolmatta (ylintä) suojausporrasta kutsutaan myös varsin yleisesti momenttiportaaksi. Suojausporras toimii välittömästi vian havaitsemisen jälkeen tai sen toiminta-aika on äärimmäisen lyhyt. Kolmatta suojausporrasta merkitään suojauskaaviossa $I_0 >>$. Sen toiminta perustuu tavallisesti mitatun nollavirran ja nollajännitteen suuruuteen. Kolmannen portaan tarkoitus on poistaa verkosta suorat, suurivirtaiset maasulut mahdollisimman nopeasti, ettei kosketusjännitteen kesto-aika ylitä määräysten sallimia arvoja. Suurin porras toteutetaan monesti suuntaamattomana, jolloin sen nopeutta saadaan parannettua. Samalla se toimii myös kaksoismaasulkutilanteissa, jolloin maasulkuvika on kahden eri lähdön välillä.

Toista porrasta merkitään suojauskaaviossa $I_0 >$. TTT-käsikirja huomauttaa, että toinen porras toimii pienemmillä mitatuilla suureilla, ja sen toiminta-aikaa on hieman pidennetty. Näin saavutetaan suojaukseen haluttu selektiivisyys. Selektiivisyydellä

voidaan varmistua oikean lähdön poistamisesta verkosta. Käytännössä tämä tarkoittaa, että porras tehdään suunnatuksi. Toisen portaan tarkoitus on pitää maadoitusjännitteet turvallisella tasolla vikapaikan ympärillä.

Ensimmäinen (alin) porras merkitään suojauskaaviossa I_0 . Ensimmäisen maasulkusuojausportaan tehtävä on toimia mahdollisimman herkkänä maasulkusuojausena. Sen tarkoitus on havaita alkavat viat, ja pyrkiä ehkäisemään vakavampia vikoja. Suojauksen toiminta-aika on ensimmäisellä portaalla huomattavasti toista ja kolmatta porrasta pidempi. (TTT-käsikirja 2000, 22-29). Monitaajuusadmittanssisuoja on tarkoitettu nimenomaan tämän suojausportaan suojaukseen. Suojalla saavutetaan riittävä herkkyys ja toimintavarmuus tämän suojausportaan toteuttamiseen. Lisäksi monitaajuusadmittanssisuojalla voidaan hoitaa keskijänniteverkon katkeilevan maasulun suojaus. Joissakin tapauksissa suojan ensimmäinen porras voidaan asettaa pelkästään hälyttäväksi, jolloin se hälyttää, mikäli verkossa on vika, joka ei ole vaaraksi. Tällöin vika voidaan poistaa hallitusti verkosta ja aloittaa sen korjaaminen ilman, että siitä aiheutuu käyttäjille sähkökatkoa. Maasulkujännitteen jäädessä alle tietyn arvon voidaan maasulkusuojaus toteuttaa hälyttävänä ja jatkaa verkon käyttöä maasulussa kahden tunnin ajan, jonka aikana vika voidaan paikallistaa ja hallitusti kytkeä irti verkosta korjausten ajaksi. Maasulkujännite saa kuitenkin olla korkeintaan 150 volttia. (SFS6001, 2015: NA.7.1.1)

4.2 Toimilohkon esittely

Tässä luvussa esitellään toimilohkon kytkennät ja niiden tarkoitus. Luvussa käydään läpi suojalta lähtevät signaalit ja niiden merkitys suojauksen toiminnassa. Olennaista on ymmärtää, miten funktio toimii verkossa, jossa on maakaapelia ja ilmajohdot, sekä jossa käytetään jälleenkytkentöjä. Taulukossa 4 on esitelty toimilohkon signaalit ja tekstissä on esitelty signaaleiden merkitys.

Taulukko 4. Toimilohkon signaalit (PCM 600)

Tulosignaalit			
NIMI	TYYPPI	OLETUSARVO	KUVAUS
I3P	RYHMÄ SIGNAALI	-	(KOLMIVAIHEINEN) SUMMAVIRTA (I0)
U3P	RYHMÄ SIGNAALI	-	(KOLMIVAIHEINEN) SUMMAJÄNNITE (U0)

BLOCK	BOOLEAN	0	FUNKTION LUKITUS
BLK_OPR	BOOLEAN	0	LAUKAISUN LUKITUS
BLK_ST	BOOLEAN	0	HAVAHTUMISEN LUKITUS
FR_TIMER	BOOLEAN	0	AJASTIMEN PYSÄYTYS
RELEASE	BOOLEAN	0	ULKOINEN TULO SUOJAN HAVAHTUMISELLE
RESET	BOOLEAN	0	ULKOINEN SUUNNAN LASKENNAN RESETOINTI
Lähtösignaalit			
NIMI	TYYPPI		KUVAUS
OPERATE	BOOLEAN		LAUKAISU SIGNAALI
START	BOOLEAN		HAVAHTUMIS SIGNAALI
FAULT_DIR	INTEGER		HAVAITUN VIAN SUUNTA
BLK_EF	BOOLEAN		VIKA TAKANA SIGNAALI
INTR_EF	BOOLEAN		KATKEILEVA VIKA SIGNAALI
PEAK_IND	BOOLEAN		TRANSIENTTI LASKURI

Suojausfunktioille tuodaan maasulkuvirta tuloon I3P, sekä maasulkujännite tuloon U3P. "Operate" -lähdestä lähtee laukaisutieto, joka viedään suoja-releen lähtökanaavaan. "Start" -lähdestä lähtee havahtumistieto, joka viedään yleensä potentiaalivaipalle koskettimelle releen koestamista varten. Edellä mainitut ovat hyvinkin yksiselitteisiä, eikä niihin tarvitse paneutua tässä yhteydessä sen enempää.

"BLK" -signaalit ovat lukituksia, joilla voidaan lukita suojausfunktioilta taulukon mukaisia toimintoja. Esimerkiksi jälleenkytkentöjen aikana on järkevää lukita monitaajuusadmittanssisuoja. Tilanteessa, jossa "Reset Delay Time" on pidempi, kuin tehtävä pikajälleenkytkentä voi monitaajuusadmittanssisuoja aiheuttaa virheellisen laukaisun, koska "Reset Delay Time" ei ole ehtinyt nollautua.

"BLK_EF" -lähden tarkoituksena on indikoida, että suojauslohko on tunnistanut vian olevan jollakin toisella lähdöllä ja on näin ollen estänyt "OPERATION DELAY TIME" -ajastimen toiminnan. Tällöin estetään lähden virheellinen toiminta. "BLK_EF" nollataan "RESET DELAY TIME" -ajastimen päästyä loppuun asti. Suojauslohkon "BLK_EF" -lähtöä voidaan käyttää suojauskonfiguraatiossa lukitsemaan muita toimilohkoja ja estämään niiden virhetoimintoja esimerkiksi katkeilevan maasulun aikana.

"FAULT_DIR" -signaalilla saadaan indikaatio viallisesta lähdestä. Signaali on tyyppilään kokonaisluku, joka kertoo vian suunnan. Vika voi olla suojan etu- tai takapuolella, tai kummallakin puolella.

"INTR_EF" -signaalilla on tarkoitus poistaa jälleenkytkennät käytöstä. Signaali vie-
dään jälleenkytkentälohkoon, ja estetään jälleenkytkennät katkailevan maasulun ai-
kana. Suojausfunktion havaitessa katkeileva maasulku, on se mitä todennäköisim-
min, sillä verkon osuudella, jolla on maakaapelia. Tällöin jälleenkytkentöjen tekemi-
nen on turhaa, koska vika ei korjaannu itsestään. Päinvastoin, mikäli tehdään jäl-
leenkytkentöjä, rasitetaan sillä verkkoa turhaan, jolloin vakavammat oikosulkuviat
ovat todennäköisempiä. "INTR_EF" ei pysty tulkitsemaan vian suuntaa, vaan se nä-
kee pelkästään katkeilevan vian virtatransientit, olivatpa ne millä lähdöllä tahansa.
Lähtö aktivoituu, kun "peak counter limit" on ylitetty. "INTR_EF"-lähtö saadaan
suunnatuksi yhdistämällä se START-signaalin kanssa, jolloin saadaan tieto katkeile-
vasta viasta ainoastaan viallisella johtolähdöllä.

4.3 Monitaajuusadmittanssisuojan asetteleminen

Seuraavaksi käsitellään monitaajuusadmittanssisuojauslohkon asettelu PCM-600-
ohjelman avulla. Kuviossa 11 on esitelty suojauslohkon asettelutaulukko, jonka jäl-
keen jokainen aseteltava arvo käydään läpi yksi kerrallaan. Tässä käydään läpi
melko tarkasti, mihin aseteltava tieto vaikuttaa. On huomioitava, että asettelutau-
lukko on REF630-releestä, eikä päde täysin REF615-releen asetteluihin.

MFADPSDE: 1					
Operation		On			
Base value Sel Res		Residual Grp 1			
Operation mode		General EF			
Min Fwd Op current		0.01	pu	0.01	1.00
Min Rev Op current		0.01	pu	0.01	1.00
Tilt angle		5.0	Deg	2.0	20.0
Peak counter limit		3		3	20
Reset delay time		0.500	s	0.000	60.000
Start delay time		0.030	s	0.030	60.000
Pol reversal		No			

Kuvio 11. MFADPSDE-lohkon asetteluikkuna (PCM600 kuvankaappaus, SLT-Consults 2018)

Ylimpänä suojausfunktioille määritetään, onko suojausfunktio käytössä. "Operation"-
riville pitää valita "On", mikäli suojaa haluaa käyttää. Suojan voi lisätä suojauskonfi-
guraatioon, vaikka sitä ei heti haluta ottaa käyttöön, jolloin suoja aktivoidaan tällä
valinnalla myöhemmin. (630 series technical manual 2014, 518)

"Base value Sel Res" -rivillä valitaan, mitä arvoja ja muuntosuhteita käytetään nollavirran ja nollajännitteen mittauksessa. "Residual Grp1" viittaa "BASERES1" -toimilohkossa analogitulolle määritettäviin arvoihin. Analogituloille määritetään perusarvot, joilla mittalaitteet toimivat. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, millä arvolla mitattua arvoa pitää kertoa, että saadaan se täsmäämään primääreihin arvoihin. Oletuksena on "Residual Grp1", jota myös yleensä käytetään. (630 series technical manual 2014, 523–524)

"Operation mode" -valinnalla määritellään, miten suojan halutaan toimivan. Vaihtoehtoina on valita suojan käyttö hälyttävänä suojana, katkeilevana suojana, tai kaikkien yksivaiheisten vikojen suojana. "General EF" suojaa kaikilta yksivaiheisilta vioilta, joka tässä tapauksessa on se, jota halutaan käyttää. (630 series technical manual 2014, 516–517)

"Min Fwd Op current" -rivillä valitaan pienin virta, kun suoja on valittu toimimaan eteenpäin. Virta asetellaan nimellisen virran kerrannaisena, eli suoja voidaan asettaa välille $0,01-1 \cdot I_n$. 100/1A kaapelivirtamuuntajalla se tarkoittaa 1-100A. "Min Rev Op current" -rivillä valitaan sama virta taaksepäin. Käytännössä virta valitaan resistiivisen jäännösvirran perusteella. Yksi tapa mitoittaa on käyttää säätäjän laskemaa resistiivistä jäännösvirtaa (kompensointikelan rinnakkaisvastuksen tuottama virta), joka kerrotaan varmuuskertoimella. Varmuuskertoimena tulee käyttää 0,5-0,7, jolloin siinä huomioidaan myös mittausketjussa (CT+VT+rele) tapahtuvat virheet. (630 series technical manual 2014, 518–519)

"Tilt angle" -rivillä valitaan suojauskarakteristikan kallistus. Valinta tehdään asteina välille 2-20 astetta. Suojauskarakteristikaa kallistetaan erityisesti kaapelivirtamuuntajan kulmavirheiden kompensoimiseksi. Virtamuuntajan valmistaja yleensä ilmoittaa, paljonko kulmaa pitää kallistaa, mutta jos sitä ei ole ilmoitettu, tulee kallistuksen olla vähintään viisi astetta. Laajennetun mittausalueen kaapelivirtamuuntajilla kallistus voi olla kaksi astetta. (630 series technical manual 2014, 509–510)

"Peak counter limit" -rivillä valitaan, kuinka monen transientin jälkeen vika tunnistetaan katkeilevaksi maasuluksi. Valinta tehdään 3-20 transientin välillä. Suositus on

käyttää kolmea, mikäli tunnistuksen halutaan toimivan herkästi ja nopeasti. (630 series technical manual 2014, 515–516). Katkeilevan maasulun tunnistuksen merkiksi ulostulo INTR_EF aktivoidaan.

”Reset delay time” -rivillä määritetään suojan resetointiaika. Ajan voi määrittää 0–60s välille. Suosituksena on käyttää 0,5s. Käytännön kokeissa on todettu, että se on tarpeeksi pitkä aika pitää suoja havahtuneena katkeilevan maasulun transienttien välillä. (630 series technical manual 2014, 518–519). Jos aika on liian lyhyt, suoja voi resetoitua katkeilevan vian piikkien välissä, jolloin katkeilevan vian poiskytkentä voi viivästyä tai estyä.

”Start delay time” -rivillä määritetään, kuinka nopeasti vian alkamisen jälkeen suoja havahtuu. Suositus on pitää asettelu vakioarvossaan 0,03s. Tätä asettelua suositellaan muutettavaksi vain hälyttävässä maasulkusuojuksessa, jos maasulkuhavahtumia halutaan viivästyttää ja niiden määrää rajoittaa. Viive määritellään aikavälille 0,03–60s. Tässä on hyvä huomata, että *start delay time* ei vaikuta laukaisemisen aikaviivettä pidentävästi. Jos *start delay time* ja *operate delay time* valitaan samaksi, suoja havahtuu ja laukaisee samanaikaisesti. (630 series technical manual 2014, 518–519)

”Pol reversal” -rivillä voidaan kääntää suojan polariteetti. Polariteetin kääntämisellä voidaan kääntää kaapelivirtamuuntajan toimintasuunta, mikäli se ei täsmää suojan toiminnan kanssa. Yleensä kuitenkin, jos johdotuksessa on tapahtunut virhe, oikeampi tapa korjata polariteetti on vaihtaa virtamuuntajalla johdinten paikkoja. (630 series technical manual 2014, 508)

Yllämainittujen asettelujen lisäksi suojalle voidaan valita neljä asetteluryhmää. Kuviassa 12 näkyy yksi asetteluryhmä (asetteluryhmä1, Setting Group1). Kaikkia asetteluryhmiä ei ole pakko ottaa käyttöön, mutta kaikki ovat aseteltavissa samassa ikkunassa.

Setting Group1					
Directional mode		Forward			
Operating quantity		Adaptive			
Voltage start value		0,10	pu	0,01	1,00
Operate delay time		0,50	s	0,06	200,00

Kuvio 12. Asetteluryhmien asetteleminen (PCM600 kuvankaappaus, SLT-Consults 2018)

”Directional mode” -rivillä valitaan suojan suunta: toimiiko suoja eteen vai taaksepäin. Tämä valinta liittyy havahtumisvirran asetteluun, jossa on valittu virta eteen ja virta taakse -minimiarvot. (630 series technical manual 2014, 509)

”Operating quantity” -rivillä valitaan nollavirran valvonta joko adaptiiviseksi tai amplitudiin perustuvaksi. Amplitudiin perustuvaa voidaan käyttää maasta erotetussa verkossa, muutoin suositellaan käytettäväksi adaptiivista. Adaptiivisella asetuksella tutkitaan kumulatiivisen monitaajuusadmittanssivektorin kulmaa: jos se ylittää 45 astetta, verrataan stabiloidun maasulkuvirran amplitudia havahtumisvirran asetteluun. Kumulatiivisen monitaajuusadmittanssivektorin kulman ollessa alle 45 astetta, verrataan stabiloidun virran resistiivisestä komponenttia havahtumisvirran asetteluun. Adaptiivinen asetus toimii myös maasta erotetussa verkossa. (630 series technical manual 2014, 513)

”Voltage start value” -rivillä asetellaan nollajännite, jolla suoja havahtuu. Tällä asetuksella voidaan toteuttaa haluttaessa suojan porrastus. Toisin kuin virtaan perustuvissa suojoissa, joissa porrastus määritellään virran suuruuden mukaan, nollajännite asetellaan nimellisvaihejännitteen suhteen $0,01-1 \cdot U_n$, jossa U_n on nimellinen vaiheen ja maan välinen jännite. (630 series technical manual 2014, 517)

”Operate delay time” -rivillä määritellään suojan toimintaviive vian synnystä. Viive valitaan haluttuun arvoon välillä 0,06-200s. Sen asettelemisessa tulee kuitenkin muistaa turvallinen toiminta-aika lain ja määräysten puitteissa. (630 series technical manual 2014, 517)

4.4 Asettelut käytännössä

Käytettäessä monitaajuusadmittanssisuojausta ensimmäisenä maasulun suojausportaana, johon suojaus on suunniteltu, riittää käytännössä seuraavien asettelujen tekeminen suojausfunktiolle. Suojan oletusarvot on aseteltu valmiiksi oikein tällaista käyttötarkoitusta varten.

- "Min Fwd/Rev Op current" (pienin toimintavirta)
- "Tilt angle"
- "Voltage start value" (kaikkiin asetteluryhmiin)
- "Operate delay time" (kaikkiin asetteluryhmiin)

On hyvä huomioida, että vaikka suojausfunktio toimii verkon kaikissa kytkentätilanteissa, ei suojan toiminta-aika itsestään päivity lyhemmäksi. Esimerkiksi sammutetun verkon toiminta-ajan ollessa pidempi kuin maasta erotetun verkon toiminta-aika, on asetteluryhmää vaihdettava maasta erotetun verkon asetteluryhmään.

Tästä syystä suojalle suositellaan aseteltavan vähintään kaksi asetteluryhmää.

Maasta erotetun verkon asetteluilla kompensoidussa verkossa ei saavuteta samoja etuja selektiivisen toiminnan suhteen kuin kompensoidun verkon asetteluilla. Toisaalta kompensoidun verkon asetteluita ei voida käyttää maasta erotetussa verkossa, koska toiminta-aika on liian pitkä ja maadoitusjännite vikapaikassa luo hengenvaaran.

5 Koestaminen

Sähköaseman koestaminen uutta sähköasemaa rakennettaessa kattaa koko toimintakokonaisuuden testaamisen ja toiminnallisuuden toteamisen. Koestamisen tulokset dokumentoidaan tarkasti. On tärkeätä tehdä koestaminen huolellisesti, sillä sen perusteella varmistetaan sähköaseman oikeellinen toiminta ennen sähköaseman käyttöönottoa.

Koestamisen aikana kaikki merkittävät virheet tulee huomata ja korjata, jotta vältetään epätoivotuilta tapahtumilta sähköasemaa verkkoon kytkettäessä. Koestettaessa varmistetaan, etteivät asennukset aiheuta vaaraa ihmisille kytkentöjen aikana. Esimerkiksi varmistutaan maadoitusten oikeellisuudesta. Lisäksi koestuksen tulok-

silla voidaan todentaa aseman oikeellinen toiminta käyttöönotettaessa, mikäli jälkikäteen ilmenee ongelmia. Koestus suoritetaan visuaalisesti, koestuslaitteella, yleismittarilla ja tarkastamalla mittauspöytäkirjat. Signaalien ja tilatietojen koestaminen tehdään manuaalisesti käymällä piirikaavio tarkasti läpi, jonka jälkeen tilatiedot tarkastetaan vielä kaukokäytöstä, sekä suojareleiltä. Koestamisen käytännöt ja järjestys vaihtelevat suuresti tekijästä riippuen. Tärkeää on kuitenkin se, että kaikki osat alueet testataan järjestelmällisesti, ja niiden toimivuus todennetaan ja dokumentoidaan luotettavasti. (Vihavainen 2018)

Suojauksen koestamisella tarkoitetaan yleisesti suojauksen testaamista ja testien dokumentointia. Koestuksen tarkoituksena on varmistaa valittujen suojien oikeellinen toiminta vikatilanteissa, sekä varmistaa suojareleen mittauskanavien toiminta. Koestettaessa suojareleeltä testataan käytännössä kaikki, mitä suojareleelle on aseteltu toimivaksi. Näitä ovat esimerkiksi virtojen ja jännitteiden mittaus, kaukokäytös signaalit, asetteluryhmien valinta ja tehon laskenta. Suojaukseen ja mittaukseen liittyvät koestukset tehdään koestuslaitteen avulla. (Vihavainen 2018)

Tässä työssä kuitenkin keskitytään vain maasulkusuojauksen toimintaan ja sen koestamiseen. Koestaminen on siis laaja kokonaisuus, jonka osa maasulkusuojaus on. Seuraavaksi käsitelläänkin maasulkusuojauksen koestamista ja tarkemmin monitaajuusadmittanssiin perustuvan suojauksen koestamista.

5.1 Maasulkusuojauksen koestaminen

Maasulkusuojauksen koestamisessa on tärkeää koestaa kaikki suojausfunktiot kaikista asetteluryhmistä. Sama suojaus voidaan tehdä usealla eri suojausfunktiolla. On siis tärkeää varmistaa, että havahtumiset ja laukaisut tulevat juuri koestettavalta suojalta, ja tarpeen mukaan koestuksen aikana on otettava rinnakkaisia suojia pois käytöstä. Suojauksen koestus suoritetaan ensiökoestuksena siinä määrin kuin se on mahdollista. Tässä tapauksessa kaapelivirtamuuntajan virta syötetään ensiöön ja nollajännite toisioon. Virran syöttämisellä ensiöön saadaan tietoon kaapelivirtamuuntajan todellinen tarkkuus. Tässä vaiheessa on tärkeätä tietää virran kulma- virhe, koska se vaikuttaa huomattavasti suojauksen tarkkuuteen ja oikeaan toimintaan.

Maasulkusuojauksen ensimmäisenä portaana toimii monitaajuusadmittanssisuoja. Varasuojaus, sekä ylemmät maasulunsuojausportaat otetaan tässä tapauksessa väliaikaisesti pois käytöstä, koska ensimmäisen portaan koestuksen aikana ei haluta havahtumisia tai laukaisuja muilta suojausfunktioilta. Muiden suojien havahtuminen aiheuttaisi virheitä ensimmäisen portaan koestuksen tuloksiin, joka tekisi suojan oikean toiminnan varmistamisen mahdottomaksi.

Monitaajuusadmittanssisuojan koestamisesta on olemassa koestusohje, jota käytetään suojan koestamiseen (1MRS758886 2017). Ohje on laadittu koestukseen, jossa käytetään Omicron-testilaitetta. Pääpiirteittäin saman koestuksen voi tehdä muillakin koestuslaitteilla, mutta Omicron on sekä Suomessa että kansainvälisesti paljon käytetty koestuslaite, jota myös SLT-Consults käyttää (Vihavainen 2018). Tästä syystä tässä työssä käydään tarkemmin läpi lähinnä Omicronilla tehtävää koestamista.

5.2 Monitaajuusadmittanssisuojan koestaminen Omicronilla

Monitaajuusadmittanssisuojan koestamisessa on tärkeää, että se tulee oikein testattua, koska suojalla on ominaisuuksia, joita perinteisillä funktioilla ei ole. Suojauksen koestamisessa täytyy ottaa huomioon CPS-laskennan vaikutus koestamiseen. Koestaminen pääpiirteittäin on samanlainen kuin millä tahansa muullakin maasulunsuojausfunktioilla. Ainoa suuri ero käytännössä perinteisiin suunnattuihin suojausfunktioihin on katkeilevan maasulun testaaminen samassa yhteydessä, ilman erillisen funktion käyttämistä. Koestettaessa on testattava seuraavat asiat:

- Havahtumisjännite
- Pienin toimintavirta
- Havahtumiskulma
- Laukaisuviive
- Katkeilevat viat

Seuraavissa kappaleissa käsitellään, kuinka nämä koestetaan ja miten ne tulee testata. Samalla kerrotaan, kuinka ne voi testata käyttämällä Omicron-testilaitetta. Omicronilla tehtävä koestus on hyvä aloittaa luomalla "test document" eli niin sanottu koestusohjelma. Valmiin koestusohjelman testit pystytään suorittamaan automaattisesti, eikä erillisiä testityökaluja välttämättä tarvitse avata erikseen.

Koestusohjelma auttaa koestajaa pitämään kirjaa siitä, mitä on koestettu ja mitkä koestuksista ovat onnistuneet. Lisäksi koestusohjelma muodostaa tehdyistä koestuksista automaattisesti koestusraportin, joka sisältää kaikki tehdyt testit, sekä niiden tulokset. Hyvällä koestusohjelmalla voidaan säästää merkittävästi aikaa koestuksen yhteydessä.

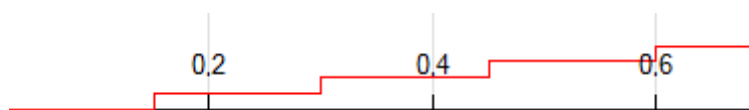
Koestamisen nopeuttamiseksi ja helpottamiseksi suojarieleeltä on yleensä johdottettu potentiaalivapaat koskettimet suojan havahtumisesta ja laukaisusta vapaille riviliittimille. Nämä kosketintiedot johdotetaan riviliittimeltä koestuslaitteelle, jolloin saadaan tarkka tieto havahtumisesta ja laukaisusta. Tulisi kuitenkin varmistua siitä, että ainakin joku testeistä tehdään siten, että katkaisija oikeasti ajetaan auki ja kiinni. Tällöin laukaisutieto olisi hyvä ottaa katkaisijan potentiaalivapaalta koskettimelta, jolloin saadaan tietoon katkaisijan oikea toiminta-aika ja varmistetaan toiminta. Mikäli käytetään jälleenkytkentöjä, on tämä hyvä tehdä jälleenkytkentöjen koestamisen yhteydessä.

5.2.1 Havahtumisjännite

Koestaminen on hyvä aloittaa testaamalla suojan havahtumisjännite, eli asettelu- taulukossa oleva "voltage start value". Havahtumisjännite määrittelee suojan perusherkkyyden, joten sen testaaminen on ensiarvoisen tärkeää.

Havahtumisjännite koestetaan siten, että jännitettä lähdetään nostamaan kohti aseteltua havahtumisjännitettä. Lähtötilanteessa jännite on selvästi oletetun havahtumisjännitteen alapuolella. Jännitettä nostetaan niin pitkään, että suoja havahtuu. Tämän testin nopeuttamiseksi kannattaa käyttää niin kutsuttua ramppia (engl. Ramp), joka nostaa jännitettä selvästi havahtumisrajan alapuolelta kohti aseteltua havahtumisjännitettä. Seuraavaksi esitellään, kuinka tämä toteutetaan käyttämällä Omicronin Ramping-työkalua.

Ramping-työkalulla voidaan säätää haluttua suuretta askeleittain haluttuun suuntaan. Tässä työssä halutaan säätää jännitettä ylöspäin. Kuviossa 13 on esitetty mitä tarkoitetaan askeleittain säätämisellä. Kuviossa vaaka-akselilla on aika ja pystyakselilla suureen suuruus.



Kuvio 13. Askeleittain säätäminen (Omicron Test Universe)

Rampin asettelussa on tärkeä huomioida, että säätää varmasti oikeaa suuretta. Kuviossa 14 on esitelty rampin asettelu. Suure valitaan kohdassa "Signal 1". Valinta tapahtuu *hardware* -konfiguraatiossa (HW) määritellyn signaalin ja lähdön perusteella. Esimerkiksi kuviossa 11 on valittu käyttöön V(2)-1, joka on määritetty nollajännitteeksi. Seuraavaksi valitaan säädettäväksi jännitteen suuruus eli "Quantity 1" -kohtaan valitaan "Magnitude". Näiden asettamisen jälkeen voidaan keskittyä varsinaisen rampin tekemiseen: Ensimmäiseksi valitaan mistä ja mihin halutaan jännitettä säädettävän. "From" -kohtaan valitaan jännite, josta halutaan rampin alkavan ja "To" -kohtaan suurin jännite, johon se voi maksimissaan nousta. Seuraavaksi valitaan, kuinka suuria askeleita jännite nousee ylöspäin. "Delta" -kohtaan siis valitaan haluttu askellus. Tämän jälkeen tarvitsee valita enää kauanko yksi askel kestää. "dt" -kohtaan valitaan siis askeleen kesto aika.

Ramp States General

Set mode: Direct Fault type: n/a Estimated test time: 10.650 s

Signal 1: V(2)-1 Quantity 1: Magnitude Signal 2: (none) Quantity 2: Frequency

Signal 1						Steps	Time	Stop condition
Ramp	From	To	Delta	dt	d/dt			
Ramp 1	18,50 V	22,00 V	50,00 mV	150,0 ms	333,3 mV/s	71	10,650 s	Start 0->1

Kuvio 14. Rampin asettelu (Omicron Test Universe)

Rampin asettelun jälkeen voidaan siirtyä asettelemaan testin hyväksytyt arvot. Kuviossa 15 on "Ramp Assessments" -välilehti, jossa määritellään hyväksyttävät arvot testaukselle, sekä se, kuinka hyväksytyt arvot määritellään.

"Ramp" -kohdassa valitaan käytettävä ramppi, mikäli niitä on käytössä useampia. "Condition" määrittää mitä tuloa käytetään testauksen lopettamiseen. Tässä tapauksessa käytetään havahtumisen aktivoitumista (Start). "Signal" -kohdassa valitaan tulkittava signaali, mikäli niitä on käytössä useampia. "Nom." -kohtaan valitaan käytännössä aseteltu toiminta-arvo. "Dev +/-" -kohdassa valitaan, kuinka paljon

asettelusta voidaan poiketa siten, että tulos on yhä hyväksyttävä.

Ramp Assessments: Jännite havahtuminen in Testiohjelma.occ											
Ramp Assessments											
	Name	Ramp	Condition	Signal	Nom.	Dev.-	Dev. +	Act.	Dev.	Assessment	Tact
1	Pick-up	Ramp 1	Start 0->1	V(2)-1	20,00 V	100,0 mV	100,0 mV			●	

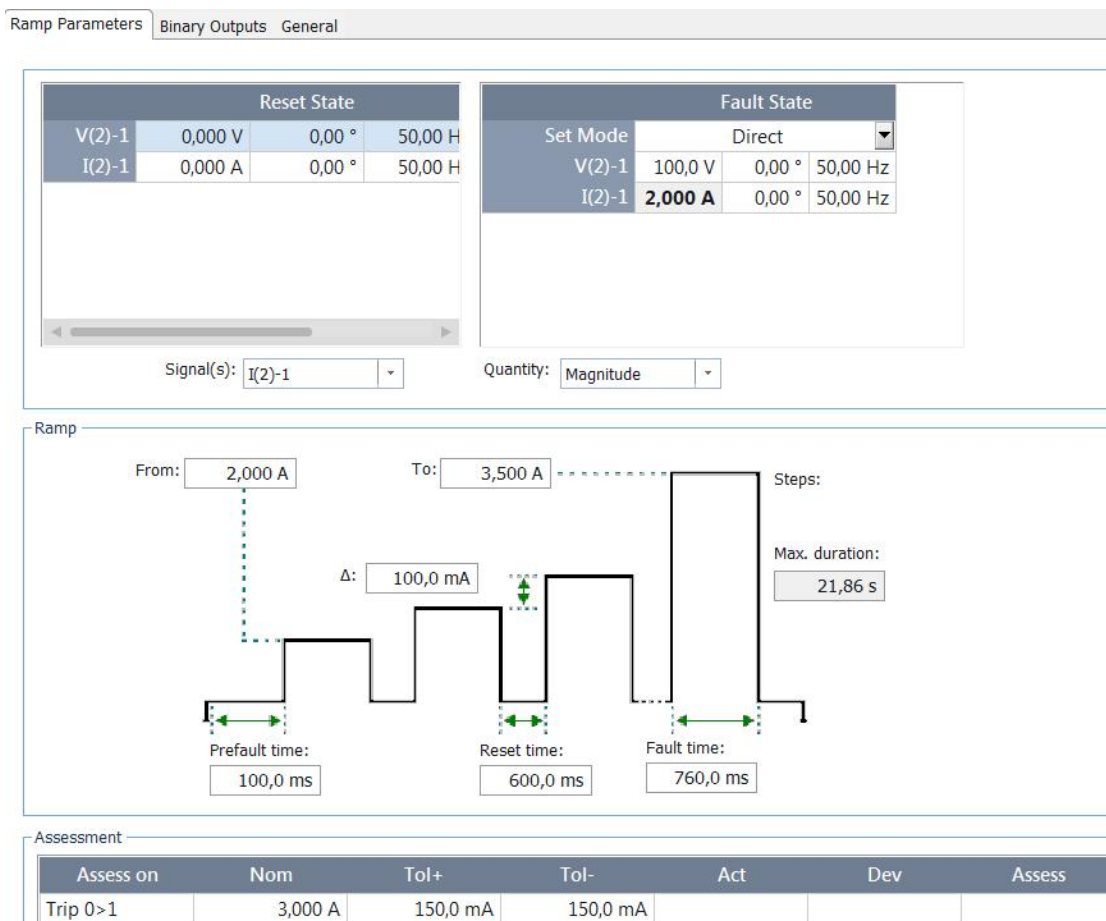
Kuvio 15. Rampin hyväksytyt arvot (Omicron Test Universe)

Jännitettä on hyvä nostaa kohtuullisin pykälin, esimerkiksi 50mV. Lisäksi syötetään virtaa, jonka arvo on selvästi yli asetellun arvon, esimerkiksi 5 ampeeria. Hyväksyttäviksi arvoiksi voidaan asettaa esimerkiksi +/-100mV asetellusta arvosta poikkeavat arvot. Hyväksytyksi jännitteeksi valitaan aseteltu jännite, esimerkiksi 20 voltia.

5.2.2 Pienin toimintavirta

Seuraavaksi koestetaan pienin toimintavirta (min op. current). Sen koestamisessa tulee ottaa huomioon CPS-laskenta. Laskenta tulee pysäyttää aina, kun virtaa nostetaan. Jos laskentaa ei pysäytetä, koestamisen tulos ei vastaa todellista arvoa vikatilanteessa. ABB:n tutkimuksissa on huomattu tämän mahdollisesti aiheuttavan virheitä koestettuihin arvoihin. Pienimmän toimintavirran testaamisella selvitetään suojauksen todellinen herkkyys. Käytännössä pienin toimintavirta tulee testata nimellisellä jännitteellä. Virran ja jännitteen välinen kulma tulee olla nolla astetta. Tällöin koestettu pienin toimintavirta vastaa aseteltua arvoa. Omicronissa on tällaiseen käyttöön kehitetty Pulse Ramping -työkalu, jossa voidaan valita askeleiden välissä olevat arvot ja aika, jolloin CPS-laskenta nollautuu. Seuraavaksi on esitelty työkalun käyttö tällaisessa koestuksessa.

Pulse Ramping -työkalulla voidaan syöttää halutun mittaisia ja suuruisia pulsseja testattavaan piiriin. Työkalua on tarkoitus käyttää suojausfunktioiden koestamiseen siten, että nostetaan haluttua vika-arvoa askelittain ylöspäin. Portaiden välissä suojan tulee päästä palautumaan normaaliin tilaan. Kuviossa 16 on esitelty asetteluikuna pulssirampille. Kuvioista voidaan nähdä myös, kuinka työkalu toimii käytännössä.



Kuvio 16. Pulssirampin asettelu (Omicron Test Universe)

Kuvion 16 vasemmassa yläkulmassa on "Reset State" -ikkuna, jossa valitaan jännitteen ja virran arvo rampin askeleiden välissä, jolloin suoja palautuu normaaliin tilaan. Vieressä olevaan "Fault State" -ikkunaan valitaan vikatilán arvot. Tässä tapauksessa niihin valitaan jännite. Virta määräytyy rampin "From" ja "To" -arvojen perusteella. Edellä mainittujen alapuolella ovat valinnat "Signal" ja "Quantity". Ne toimivat kuten Ramping-työkalussa. "Prefault time" on aika, joka menee testauksen aloittamisesta ensimmäiseen askeleeseen. Tässä testissä tällä ei ole merkitystä, mutta arvoksi voi valita esimerkiksi 100ms. "Reset time" on jokaisen askeleen välissä oleva nollaus aika. Nollausajan täytyy olla pidempi kuin suojan "reset delay time", koska suojan tulee voida palata normaaliin tilaan ennen seuraavaa askelta. "Fault time" on kunkin askeleen vikavirran syöttämisaika. Askeleen kestoajan tulee olla pidempi kuin suojan toimintaviive, jotta saadaan indikaatio suojan toiminnasta.

Yhteenvetona rampille tulee asettaa seuraavat arvot:

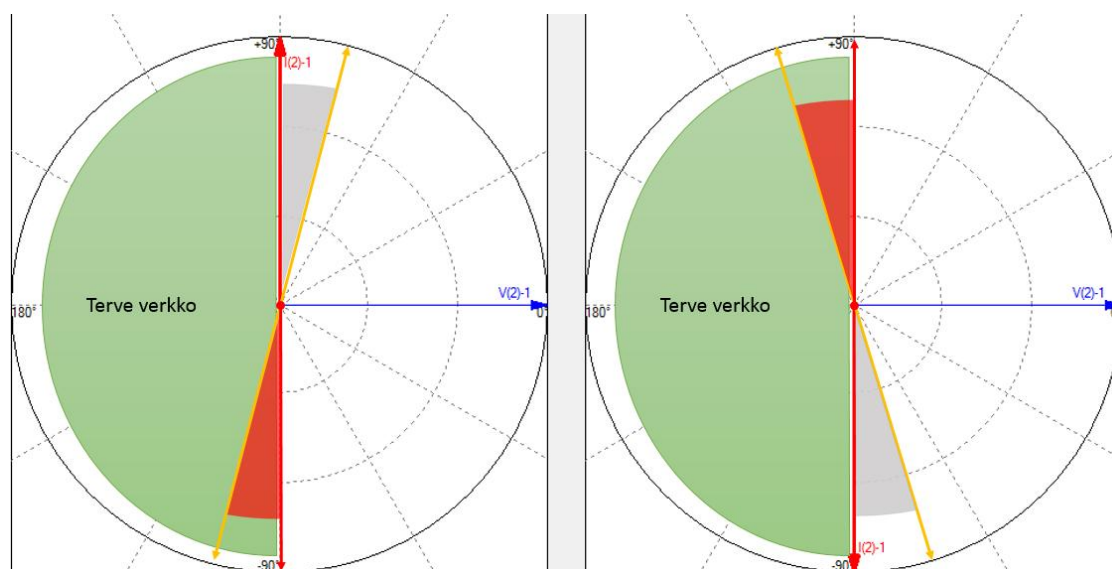
- "reset time" pidempi kuin suojan "reset delay time"
- "Fault time" pidempi kuin suojan "Operate delay time"

- "From" valitaan selvästi asetellun virran alle
- "To" valitaan selvästi yli asetellun virran
- " Δ " valitaan haluttu virran nousu, esimerkiksi 100mA

"Reset State" -arvot määritellään nolnaan, jotta CPS-laskenta nollautuu. "Fault State" -jännitteeksi valitaan nimellinen jännite, tässä tapauksessa 100V. "Asses on" -kohdasta valitaan laukaisun aktivoituminen. "Nom" -valinnasta asetellaan pienin toimintavirta esim. 3A. "Tol+/-" 150mA. Suojan toimiessa oikein laukaisu saadaan noin 3 ampeerin virralla. Tällöin suojan herkkyys on asettelu mukainen.

5.2.3 Laukaisukulma

Monitaajuusadmittanssisuojaa koestettaessa on tärkeä varmistaa, mikä on suojan todellinen laukaisukulma. Suojalla on laaja toimintasektori 180° nollajännitteeseen nähden. Toimintasektori on $+90^\circ$ - -90° , kuten kuviosta 17 huomataan. Mikäli suojan "Tilt Angle" on aseteltu virheellisesti liian pieneksi, se kääntää virran vektoreita vasemman puoleisen kuvion mukaisesti. Yläpuolelle jää sektori, jota suoja ei suoja ja alapuolelle jää sektori, jossa suoja toimii virheellisesti myös terveessä verkossa. Suojan "Tilt Angle"n ollessa liian suuri ilmiö muuttuu päinvastaiseksi, kuten oikealla esitettyssä kuviossa. Tästä syystä "Tilt Angle"n koestaminen on äärimmäisen tärkeää tehdä huolellisesti ja tarpeen mukaan korjata "Tilt Angle" -asetus oikeaksi.



Kuvio 17. Laukaisukulmien testaaminen (Omicron Test Universe)

Laukaisukulma tulee koestaa askeltamalla nollajännitteen ja nollavirran välistä kulmaa nimellisellä jännitteellä ja virralla. Selkein tapa on syöttää jännite nollakulmassa ja muuttaa virran kulmaa. Kulmaa tulee säätää siten, että aloitetaan terveen verkon puolelta ja siirrytään suojan toimintasektorille. Tässä tapauksessa virta syötetään virtamuuntajan ensiöön, joten odotettu toiminta suojalle tulee kulmassa -90°, sekä 90°.

Omicronissa tämänkin koestamiseen kannattaa käyttää Pulse Ramp -työkalua, koska CPS-laskenta täytyy nollata jokaisen askeleen välissä. Rampille tulee asettaa seuraavat arvot:

- "reset time" pidempi kuin suojan "reset delay time"
- "Fault time" pidempi kuin suojan "Operate delay time"
- "From" valitaan -100° (toinen ääripää 100°)
- "To" valitaan -50° (toinen ääripää 50°)
- "Δ" valitaan kulman askellus, esimerkiksi 1°

"Reset State" -arvot valitaan nollaan, jotta CPS-laskenta nollautuu. "Fault State" -jännitteeksi valitaan nimellinen jännite 100V ja virraksi nimellinen virta 1A. "Asses on" -kohdassa valitaan laukaisun aktivoituminen. "Nom" -kohdassa valitaan aseteltu laukaisukulma eli -90° ja 90° "Tol+/-" 3°.




Tässä vaiheessa on hyvä huomauttaa, että mikäli virtamuuntajan "Tilt Angle" ei ole tiedossa pienille virroille, se on hyvä testata. Testauksen voi tehdä syöttämällä aseteltua pienintä toimintavirtaa kulmassa -90° jännitteeseen nähden ja tarkastaa suojareleen mittausarvoista kulma, jonka suojarele mittaa. Näin ollen saadaan selville virtamuuntajan kulmavirhe, joka voidaan asettaa suojan "Tilt Angle" -asette- luun.

5.2.4 Laukaisuviive

Laukaisuviive on myös tärkeä testata. Laukaisuviive määrittää suojan toiminta-ajan, ja sen tulee toimia asetellulla tavalla. Toiminta-ajan perusteella voidaan varmistua siitä, ettei vikapaikan maasulkujännite pääse nousemaan vaarallisen suureksi, eikä se ehdi vaikuttaa liian kauan. Laukaisuviiveen perusteella siis määritellään, täyt- täkö suojaus lakiin ja määräyksiin perustuvat vaatimukset.

Laukaisuviive tulee testata syöttämällä suojalle vikapulsseja, joiden perusteella mitataan suojan toiminta-aika. Esimerkiksi silloin, kun suojan laukaisuajaksi on määritetty 700ms, suoja ei saa laukaista, mikäli sille syötetään 690ms pulssi. Tämän jälkeen suojan annetaan palautua normaalitilaan, eli odotetaan "Reset Delay Time" - ajan mittainen aika, jonka jälkeen syötetään suojalle 710ms kestoisen pulssi. Tällöin suojan tulee laukaista. Tämän jälkeen tiedetään suojan laukaisuviiveen olevan asetellun mukainen. Virtana ja jännitteenä tässä voidaan käyttää havahtumisen ylittävää nollajännitettä ja minimitoimintavirran ylittävää nollavirtaa. Suojan tulee toimia kaikilla minimiarvot ylittävillä arvoilla.

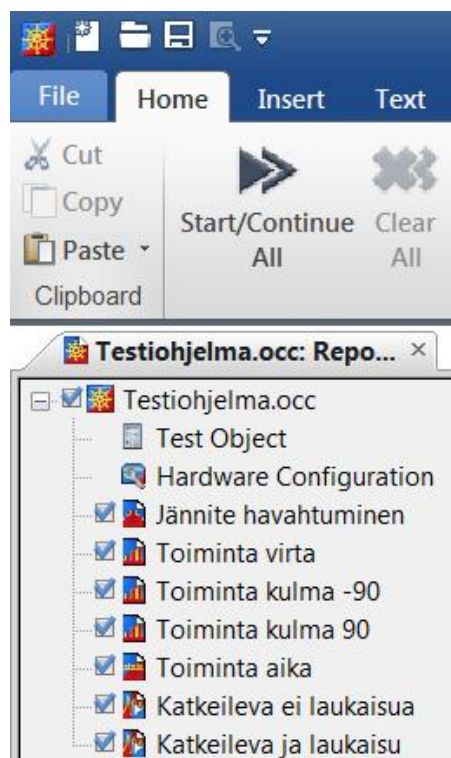
Laukaisuviive voidaan testata Omicronilla monella eri tavalla. Seuraavaksi esitellään, miten tässä työssä laukaisuviive testattiin. Omicronissa on State Sequencer -työkalu, jolla voidaan simuloida halutunlaisia sekvenssejä, joiden arvot voidaan määrittellä halutunlaisiksi. Tällä työkalulla pystytään testaamaan lähes kaikki, mitä tarvitsee testata. Työkalun ainoa ongelma ramppien tekemisessä on se, että eri sekvenssejä täytyy luoda useita. Tässä tapauksessa työkalun käyttäminen on kuitenkin perusteltua, kun testaamiseen riittää kolme sekvenssiä ja niiden määrittäminen on suhteellisen yksinkertaista. Kuviossa 18 on esitelty State Sequencer -työkalun aset-

Table View: Toiminta aika in Testiohjelma.occ									
	1			2			3		
Name	State 1			State 2			State 3		
V(2)-1	25,00 V	0,00 °	50,000 Hz	0,000 V	0,00 °	50,000 Hz	25,00 V	0,00 °	50,000 Hz
I(2)-1	5,000 A	0,00 °	50,000 Hz	0,000 A	0,00 °	50,000 Hz	5,000 A	0,00 °	50,000 Hz
CMC Rel	0 output(s) active			0 output(s) active			0 output(s) active		
Trigger		690,0 ms			1,000 s			710,0 ms	

Kuvio 18. Sekvenssi työkalun asettelu (Omicron Test Universe)

telu.

Tähän mennessä mainitut koestukset voi hyvin tehdä potentiaalivapailla koskettimilla, jotka on johdotettu suojareleeltä. Myöskään katkaisijan ei tarvitse olla viireessä. Lisäksi hyvin tehdyllä koestusohjelmalla nämä kaikki voi suorittaa valitsemalla koestusohjelmassa "Start All", jolloin ohjelma suorittaa automaattisesti koestuksen, mikäli arvot ovat hyväksytyjä. Kuviossa 19 on esitelty painike (Start/Continue All), josta voidaan suorittaa koko testin ajaminen kerralla. Lisäksi kuviossa näkyy koko koestusohjelma ja miten se näkyy Omicron Control Centerissä.



Kuvio 19. Testien suorittaminen automaattisesti (Omicron Test Universe)

5.2.5 Katkeilevan maasulun koestaminen

Poiketen edellisistä koestuksista siirryttäessä koestamaan katkeilevaa maasulkua on hyvä ottaa käyttöön myös katkaisija ja testata sen toiminta vikojen aikana. Samalla tulee testattua toiminto, jolla estetään jälleenkytkennät katkeilevan vian aikana, sekä saadaan katkaisijan ja suojauskeskeen todellinen toiminta-aika tietoon. Tämän voi johdottaa valmiiksi jo koestuksen alussa Omicronin sisääntuloon ja lisätä sen HW-konfiguraatioon.

Koska katkeilevat maasulut ovat kaapeloidun verkon yleisimpiä vikoja, suojan toiminta niiden aikana tulee testata huolellisesti. Lisäksi, kuten aiemmin työssä on mainittu, katkeilevien maasulkujen aikana on turha tehdä jälleenkytkentöjä. Koestettaessa pitää siis selvittää, tunnistaako funktio katkeilevat maasulut, ja varmistua siitä, että se ei tee laukaisua vikojen ollessa hetkellisiä. Katkeilevasta maasulusta tulee siis testata "Peak Counter Limit", sekä suojan toiminta.

Katkeilevan maasulun testaamiseen ei oikeastaan ole muuta tapaa kuin syöttää koestuslaitteella oikean katkeilevan maasulun häiriötallenne. Hyväksi koettu tapa on tehdä koestaminen esimerkiksi Advanced TransPlay -työkalun avulla. Häiriötallenteiden kanssa työskenteleminen vaatii perehtyneisyyttä. Monesti tallenteissa on

useita nauhoitettuja signaaleja, joista käyttöön tulee valita juuri oikeat, että suoja ylipäättään toimii. Lisäksi joissakin tallenteissa arvoja pitää skaalata, että niitä voidaan simuloida. Tähän häiriötallenteiden valintaan palataan myöhemmin käsitellessä koestuksen tuloksia.

5.3 Huomioita koestamisesta

Opinnäytetyön tavoitteenmukainen koestaminen suoritettiin Itä-Suomessa huhtikuussa 2018. Tavoitteena oli suorittaa myös käyttöönotto ja maasulkukoe monitaajuusadmittanssia käyttäen, mutta opinnäytetyön laajuusrajoitusten vuoksi varsinaisen käyttöönotto ja maasulkukoe päätettiin jättää suorittamatta. Niiden tekeminen ja dokumentoiminen osoittautui opinnäytetyön laajuuteen nähden liian raskaaksi. Koestaminen tehtiin suojauksen kannalta siinä laajuudessa kuin se käyttöönottoa varten tulisi tehdä. Tässä luvussa esitellään koestamisprosessia, sekä niitä asioita, joita koestamisen aikana tuli esille, ja joiden huomioiminen voi olla jatkossa hyödyllistä koestusta tehdessä. Monitaajuusadmittanssisuojan koestaminen tehtiin käytössä olevan sähköaseman varakentässä. Varakenttä sopii tällaiseen testaukseen erittäin hyvin, koska se on käytännössä aito koestustilanne aidoilla laitteilla. Tällaiseen testaamiseen pitää luonnollisesti saada verkkoyhtiöltä lupa.

Koestamiseen varattiin kaksi päivää aikaa. Ensimmäisenä päivänä oli tarkoitus tarkastaa virtamuuntajan toiminta, sekä saada lisättyä suojareleen konfiguraatioon monitaajuusadmittanssisuoja. Lisäksi oli tarkoitus mahdollisesti kokeilla, miten suojan koestaminen onnistuu. Ensimmäisenä päivänä konfiguroinnissa minua opasti opinnäytetyön ohjaajani Vili Vihavainen. Toisena päivänä oli tarkoitus keskittyä koestusohjelman muokkaamiseen siten, että koestaminen olisi mahdollisimman helppo ja nopea tehdä. Lisäksi toiselle päivälle varattiin aikaa vertailla monitaajuusadmittanssisuojausta asemalla jo käytössä oleviin suojausfunktioihin. Varattu aika osoittautui varsin riittäväksi tähän tarkoitukseen.

5.3.1 Ensimmäisen päivän koestukset

Ensimmäisenä päivänä tehdyt valmistelut itse koestamista varten eivät varsinaisesti kuulu opinnäytetyön sisältöön, joten niiden tulokset käsitellään vain pääpiirteittäin.

Virtamuuntajia testatessa huomattiin positiivisena seikkana, että alkuperäiset virtamuuntajat toimivat odotettua paremmin. Virtamuuntajan kulmavirheet eivät olleet niin suuria kuin alun perin oletettiin. Lisäksi konfiguroinnin tekeminen suojalle oli helppoa, eikä siinä tullut eteen mitään suurempia ongelmia.

Suojausasetteluiden tekemiseen käytettiin aseman vanhoja suojausasetteluita pohjana. Pienin toimintavirta aseteltiin kompensointikelan lisävastuksen mukaan, jolloin asetelluksi arvoksi tuli 3 ampeeria, kun varmuuskertoimet otettiin huomioon. Tässä tapauksessa asetelluilla arvoilla ei koestamisen kannalta ollut suurta merkitystä, koska tarkoituksena kuitenkin oli testata, miten suoja otetaan käyttöön.

Ensimmäisenä päivänä päästiin aloittamaan koestamisen. Jostain syystä ennalta suunniteltu koestusohjelma ei kuitenkaan toiminut kunnolla. Syynä oli todennäköisesti virhe koestusohjelmassa, ja virheen aiheuttaja oli todennäköisesti kokemattomuus ohjelman käytössä. Tässä vaiheessa päivä alkoi kääntyä iltaan, joten loput koestamiset jätettiin suosiolla seuraavalle päivälle. Saavuttuamme takaisin toimistolle jäin kirjaamaan päivän tulokset tietokoneelle. Päätin myös tehdä koestusohjelman uudelleen, jotta sitä voisi käyttää seuraavan päivän koestuksissa.

5.3.2 Toisen päivän koestukset

Toisen päivän koestuksissa Vihavainen ei enää ollut mukana, koska olimme edellisenä päivänä käyneet käytännöt ja säännöt tarkasti läpi, ja minulle oli selvää, mitä voitiin tehdä ja mitä ei. Minulla oli myös aikaisempaa kokemusta sähköasemalla työskentelystä ja koestamisesta, joten katsoimme, että ohjaajan läsnäolo ei olisi tuonut koestamiseen merkittävää lisäarvoa.

Koestaminen suoritettiin syöttämällä nollavirta virtamuuntajan läpi, eli virtamuuntaja koestettiin ensiönä. Nollajännite syötettiin suoraan suojareleen riviliittimien kautta suojareleelle, eli toisioon. Suojan havahtuminen saatiin aikaan käyttämällä suojareleen vapaana olevaa potentiaalivapaata kosketinta, joka ohjattiin kiinni suojan havahtuessa. Laukaisutieto saatiin samalla periaatteella kuin havahtumistieto.

Uudelleen tehty koestusohjelma toimi moitteetta heti aamusta, joten koestamiseen päästiin käsiksi viivytyksettä. Aiemmissa kappaleissa on kerrottu jo tarkemmin,

kuinka koestus tulee tehdä, joten tässä ei tarkemmin käydä enää yksittäisiä osia koestamisesta läpi.

Suojauksen testaaminen aloitettiin tekemällä kaikki koestukset useaan kertaan, testaten hieman eri arvoja. Rampeille kokeiltiin erilaisia arvoja ja aikoja. Lisäksi suojauksen toimivuus testattiin erilaisilla arvoilla. Tarkoituksena oli hakea sopivat ajat, kulmat, virrat ja jännitteet, joilla koestaminen olisi nopeaa ja joilla suojaus toimisi varmasti oikein. Tällä koestusohjelmalla tarkoituksena on kuitenkin koestaa suurempia massoja, jolloin ohjelman tehokkuus nopeuttaa työtä.

Lisäksi luonnollisesti oli harkittava, millä tarkkuudella suojan toiminta-arvot voitiin hyväksyä, sekä millaisia arvoja koestamisesta saatiin. Eniten pohdintaa aiheutti virtamuuntajan kulman mittaaminen ja sen tarkkuus.

5.3.3 Koestamisen tulokset

Koestamisen aikana kerätty mittaustiedosto ja tehdyt kokeet osoittivat monitaajuusadmittanssisuojan olevan erittäin toimiva ja tarkka maasulunsuojausfunktio. Monitaajuusadmittanssin (MFADPSDE) vertailua suoritettiin suunnattuun maasulkusuojaan (DEFLPDEF) ja katkeilevan maasulunsuojausfunktion (INTRPTEF) välillä.

Suojan laajennettu toimintasektori vaikutti koestettaessa siten, ettei suunnattu maasulkusuojaus ennättänyt edes havahtua ennen kuin monitaajuusadmittanssisuoja oli jo laukaissut, kun molemmat suojausfunktiot olivat käytössä. Tästä voidaan päätellä monitaajuusadmittanssisuojan toimivan paremmin, mikäli maasulkuvirta on erittäin kapasitiivinen tai induktiivinen riippuen verkon kompensointiasusteesta. Suojaus siis toimii paremmin, mikäli verkko on kompensoimaton ja maasulkuvirrat ovat suuret. Lisäksi, mikäli vika ei ollut suojattavalla lähdöllä, suoja ei toiminut kertaakaan koestuksen aikana. Toisin sanoen suojaus ei toiminut, jos vikavirran kulma oli yli 90° , tai -90° nollajännitteeseen nähden. Tästä voi päätellä CPS-laskentaan perustuvan kulman mittaamisen olevan hyvä parannus.

Katkeilevan maasulun koestamisessa tehtiin tarkoituksella pienivirtainen katkeileva maasulkuvika. Vian maksiminollavirta oli 22,81 ampeeria ensiössä. Vian maksiminollajännite 9,6kV ensiössä. Tällä haluttiin testata katkeilevan maasulkusuojauksen

herkkyyttä, sekä verrata sitä perinteiseen katkeilevan maasulun suojaan. Häiriötolenteella monitaajuusadmittanssisuoja toimi virheettää ja laukaisu tuli oikeaan aikaan, kun vastaavasti perinteinen suoja ei edes havahtunut. "Peak counter limit" oli aseteltu kolmeen molemmilla suojilla. Monitaajuusadmittanssisuoja havahtui jokaisella testauksella neljännellä transientilla, jolloin suoja toimi täysin oikein ja odotetusti. Tästä voidaan päätellä, että laskennalliseen virtaan ja admittanssiin perustuva katkeilevan maasulun suojaus on selvästi herkempi kuin perinteinen suojausfunktio.

Yhteenvetona näihin testeihin perustuen ja voimakkaasti yleistäen voidaan siis todeta, että monitaajuusadmittanssisuoja kannattaa ottaa käyttöön kaikilla asemilla, joilla se on mahdollista. Vaikka virtamuuntajia ei vaihdettaisi yhdistetyn suojausluokan virtamuuntajiin, suojausfunktio on toiminnaltaan parempi kuin aiemmin käytössä olleet suojausfunktiot, ainakin ABB:n releissä. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan tutkittu kilpailijoiden suojausfunktioita, eikä tuloksia voida siis pitää täysin kattavina. Lisäksi erittäin lyhyen ajan, tässä tapauksessa kahden päivän, aikana kerättyjä tuloksia suojan koestamisesta ja testaamisesta ei voida muutenkaan pitää kovin kattavina tai laajoina tuloksina. Voidaan kuitenkin todeta, että saadut tulokset ovat yhteneviä ABB:n tekemien testausten kanssa. Tämä vahvistaa positiivista käsitystä suojan toimivuudesta.

Suojauksen laajennettu toimintakarakteristika on hyvä paikoissa, joissa voi olla joko kompensoitu verkko tai maasta erotettu verkko, etenkin mikäli kompensointilaitteisto on kytketty sellaiseen paikkaan, ettei tieto välity kompensoinnin tilanteesta. Esimerkkinä voidaan pitää 20kV kytkinasemia, joille syöttö tulee toiselta sähköasemalta, johon kompensointilaitteisto on asennettu.

Katkeilevan maasulun indikointi on hyvä ajatellen haja-asutusalueiden sähköverkon suojaamista, joissa osa verkosta on maakaapeloitu ja osa on ilmajohtoa. Indikoinnilla saadaan poistettua jälleenkytkennät käytöstä ja siten vähennettyä turhaa rasi-tusta vikatilanteissa.

5.3.4 Koestamisen kehittäminen

Koestamiseen tehtyä ohjeistusta (1MRS758886 2017), jota tässä työssä käytettiin, voidaan pitää erittäin selkeänä. Ohjeistuksessa annetaan myös seikkaperäisiä ohjeita siitä, kuinka koestaminen tulisi tehdä. Ohjeiden avulla koestaminen sujui ongelmitta. Siten ehdotukset koestamisen kehittämiseksi alla liittyvät enimmäkseen katkeilevan maasulun suojaus- ja testaamiseen. Koestamisen aikana eteen tuli muutamia ongelmia, joihin todennäköisesti muutkin koestajat törmäävät.

Ensimmäisenä ongelmana voidaan mainita se, että häiriötallenteissa on monesti nauhoitettu useita eri kanavia. Näiden kanavien nauhoitteiden nimet eivät aina ole kovin kuvaavia tai selkeitä. Tästä seuraa se, ettei koestaja voi välttämättä olla varma, mitkä kanavat ovat testaustarkoitukseen oikeita. Tämä aiheuttaa pienen epävarmuuden suojan toiminnasta, vaikka koestuksesta saadut tulokset olisivat muutoin täysin hyväksyttäviä.

Toinen ongelma liittyy virtojen skaalaukseen. Etenkin virtojen syöttäminen muuntaajan ensiöön aiheutti koestustilanteessa haasteita. Tallenteissa monesti vikavirrat ovat satoja ampeereita, eikä koestuslaitteella yleensä pystytä syöttämään näin suuria virtoja. Voidaan kuitenkin pitää tärkeänä sitä, että katkeileva maasulku syötetään nimenomaan virtamuuntajan ensiöön, koska tällöin esimerkiksi suojauskarakteristikan kallistus on oikein.

Tämän työn puitteissa suurimmat havaitut koestamiseen liittyvät puutteet liittyvät nimenomaan katkeilevien maasulkujen koestamiseen. Etenkin mikäli virtamuuntaja ei täytä laajennetun suojausluokan vaatimuksia, olisi tarpeellista testata katkeilevat maasulut virtojen osalta ensiönä. Lisäksi nimenomaan sellaiset ääritilanteet, joissa suojaus- ja toiminta vaarantuu virtamuuntajan epätarkkuuden takia, tulisi testata tarkoin.

Yleisesti siis olisi tärkeätä, että saatavilla olisi tallenteita, joissa olisi vain yksi virta ja jännite, ja joiden avulla katkeileva suojaus olisi helppo testata. Lisäksi tallenteita olisi tarpeen olla useampia, jotta niitä voitaisiin käyttää erityyppisten katkeilevien vikojen simulointiin. Tällaisten tallenteiden etsimiseen ei yleensä tavallisen koestajan ammattitaito riitä, eikä soveltuvia tallenteita ole välttämättä saatavilla. Henkilökohtaisesti minun ammattitaitoni ei vielä riitä tällaisten tallenteiden tulkintaan ja

valitsemiseen, joten tallenteiden valinnan voisi tehdä esimerkiksi ABB:n asiantuntija. Tällainen apu olisi monelle koestajalle erittäin tarpeellista, jotta koestamisen laatua saataisiin parannettua ja koestamisen aikana sattuvia virheitä minimoitua.

6 Pohdinta

Opinnäytetyö prosessina oli erittäin raskas. Suurin syy tähän oli varsinkin opinnäytetyöprosessin alussa aiheen rajaaminen. Aihe oli minulle vieras, eikä minulla ollut riittävää tietotaitoa aiheen rajaamiseen riittävän suppeaksi. Tällaiset suuret kokonaisuudet voisi tulevaisuudessa miettiä tehtäväksi usean opiskelijan toimesta. Samalla opiskelijat pääsisivät tekemään yhdessä töitä ja kehittämään projektitaitojaan tulevaa työuraa varten. Toisaalta tällainen opinnäytetyöprosessi on opettanut minulle paljon, vaikka välillä on tuntunut, ettei tästä tule ikinä valmista. Tuntemattomamman aiheen tutkiminen on henkisesti raskasta, koska suurin osa vastauksista kysymyksiin pitää selvittää itse, eikä kaikkiin kysymyksiin aina löydy nopeasti, tai lainkaan, valmista vastausta. Vastaukset on pääteltävä yhdistelemällä eri lähteistä kerättyä tietoa. Tämä yhdistettynä siihen, että käytännössä aloittaessa työn tekeminen tietotasoni aiheesta oli käytännössä olematon, tarkoittaa sitä, että olen oppinut aika paljon maasulkusuojauksesta.

Tehdyn tutkimustyön maasulkusuojausta ja maasulkuilmiöstä oli tarkoitus avata kokonaisuutena, mitä maasulkusuojaus on, sekä tutkia tarkemmin, mikä on monitoringin ja mittauslaitteiden osia. Näitä on pyritty opinnäytetyössä avaamaan kattavasti. Opinnäytetyön luettuaan lukija ymmärtää paremmin, mitä on maasulkusuojaus. Vastaavanlaisia opinnäytetöitä on tehty aiemminkin, mutta niissä ei ole keskitytty maasulkusuojausten haasteisiin maakaapeloinnin lisääntyessä, eikä esitetty ratkaisuja näihin ongelmiin. Varsinainen suojan asettelu ja koestaminen olivat loppujen lopuksi opinnäytetyössä suhteellisen pieni osa. Olen tyytyväinen, siitä millainen opinnäytetyöstä tuli. Vanha sanonta, että ”työ on tekijänsä näköinen” pätee tässä varsin hyvin.

Opin perusteet siitä, mitä tieteen tekeminen on, kuinka tiedettä tehdään, mitä on lähteiden hallinta ja tutkimustyö ja kuinka tuotetaan luotettavaa asiatekstiä. Tällaisiin asioihin en ennen opinnäytetyön aloittamista ollut juurikaan perehtynyt. Näihin

asioihin sain hyvää opastusta asiantuntevilta ihmisiltä. Tällaisten asioiden perusteiden ymmärtäminen on auttanut minua arvostamaan tehtyjä tutkimuksia ja niiden tuloksia entistä enemmän. En vieläkaan väitä, että tutkimus sujui minulta sujuvasti, mutta ainakin sain käsityksen siitä, mitä se on.

Opinnäytetyö opetti myös ammatillisesti erittäin paljon. Ennen opinnäytetyön aloittamista minulla ei käytännössä ollut mitään käsitystä siitä, mitä maasulkusuojaus on. Nyt tiedän suojauksesta paljon enemmän ja pystyn antamaan asiantuntevaa konsultaatiota aiheesta, ainakin omassa työyhteisössäni. Työkokemuksen puute luonnollisesti heikentää uskottavuuttani, mutta koen saaneeni tästä opinnäytetyöstä erittäin hyvän pohjan kasvattaa omaa osaamistani sähkötekniikan parissa.

On selvää, että maakaapeloinnin lisääntyessä keskijännitteisessä verkossa riittävän selektiivisten ja herkkien maasulkusuojausfunktioiden tärkeys tulee ennestään kasvamaan. Monitaajusadmittanssiin perustuva maasulkusuojaus vaikuttaa erittäin lupaavalta ratkaisulta maasulkusuojauksen uusiin haasteisiin, ja onkin kiinnostavaa nähdä, kuinka maasulkusuojaus tulee jatkossa kehittymään. ABB:n monitaajusadmittanssiin perustuva maasulkusuojaus on alansa kärkeä, mutta on mahdollista, että jatkossa myös muut toimijat kehittävät vastaavia suojausfunktioita. Monitaajusadmittanssisuojauksen asettelu ja koestaminen osoittautuivat odotettua helpommiksi ja koen, että tämäntyyppisen suojan käyttöön ottaminen on perusteltua aina, kun se on mahdollista. Säävarmempaa verkkoa kehitettäessä on tärkeätä varmistua siitä, että ihmisten ja eläinten suojaaminen verkon vioilta tehdään huolellisesti ja parhaita suojausfunktioita käyttäen.

Työn toimeksiantaja on ilmaissut tyytyväisyytensä tämän opinnäytetyön yhtiölle kokonaisuudessa tuottamaan lisäarvoon. Koestusohjelma ja ohjeet koestuksen tekemiseen luovutettiin toimeksiantajalle niiden valmistuttua. Niiden perusteella monitaajusadmittanssiin perustuva maasulkusuojaus kyetään tuotteistamaan yhtiön käyttöön nopeasti ja helposti. Tämän lisäksi yrityksen henkilökunta on saanut opinnäytetyöprosessin aikana käsityksen siitä, mikä monitaajusadmittanssisuojaus on ja kuinka sitä käytetään. Opinnäytetyön perusteella voidaan laatia koulutusmateriaaleja suhteellisen helposti, mikä helpottaa suojauksen käyttöönottoa tulevaisuudessa. Kokonaisuudessaan työn toimeksiantaja on ollut tyytyväinen prosessiin ja opinnäytetyöhön sen valmistumisvaiheessa.

On luonnollista, että suurin saamani hyöty opinnäytetyöprosessista on henkilökohtaista: olen oppinut paljon maasulkusuojauksesta, sekä samalla suojauksesta yleisesti. Olen luonut hyviä kontakteja ABB:n suuntaan ja heidän apunsa onkin ollut opinnäytetyön tekemisessä ensiarvoisen tärkeää. Toinen merkityksellinen asia on opinnäytetyön tuloksista kerätty tieto monitaajuusadmittanssisuojan tuotteistamista varten. Tällä hetkellä näyttää siltä, että näitä suojauksia suunnitellaan käyttöönotettaviksi useilla sähköasemilla lähitulevaisuudessa. Omalta kannaltani siis taloudelliset panostukset opinnäytetyöhön näyttäisivät kannattavilta.

Lisäksi opinnäytetyöstä on toivottavasti apua myös muille opiskelijoille, jotka tekevät maasulkusuojaukseen liittyviä tutkimuksia. Katkeilevan maasulun suojien vertailua tulisi jatkossa tehdä enemmän ja useammilla erilaisilla simulaatioilla. Tämän työn puitteissa se ei ollut ajallisesti tai työmäärällisesti mahdollista, mutta tulevassa tutkimuksessa voisi olla hyödyllistä vertailla myös eri valmistajien ja kehittäjien suojausfunktioita. Lisäksi voitaisiin tutkia sitä, kuinka koestaminen ja käyttöönotto saataisiin mahdollisimman selkeäksi prosessiksi, ja pystytäänkö niitä nykyisestään nopeuttamaan tai helpottamaan käyttämällä erilaisia suojausfunktioita.

Lähteet

1MRS758886. 2017. 1MRS758886 EN Technical note – Testing multi-frequency admittance-based protection function MFADPSDE with Omicron. ABB Oy.

639 series technical manual (revision E). 2014. ABB Oy. [verkkomateriaali]

Saatavilla:

https://library.e.abb.com/public/aa3e3a40dc887dcdc1257dc7004c453f/RE_630_tech_756508_ENe.pdf [Viitattu 24.3.2018].

Aalto, H-M. 2018. Koulutustilaisuus, Keskijänniteverkkojen relesuojaus sähkölaitoksille.

Altonen, J. & Wahlroos, A. 2017. Kompensoidun kaapeliverkon haasteita maasulkusuojaukselle.

Elovaara, J. & Laiho, Y. 1993, 3p. Sähkölaitostekniikan perusteet. Hämeenlinna: Karisto.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot 2. Helsinki: Otatieto.

HE 218/2002. Hallituksen esitys Eduskunnalle laeiksi sähkömarkkinalain sekä maakaasumarkkinalain 4 luvun 6 §:n muuttamisesta. 2002. Finlex. Lainattu 28.11.2017

Holmlund, J. 2016. Älykkäämpää vianhallintaa kaapeliverkossa. Webinaaritalenne. Viitattu 28.11.2017.

https://www.youtube.com/embed/dPs_r7xTYDo?html5=1&rel=0&wmode=transparent&autoplay=1

Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. 3. painos. Helsinki: Otatieto.

Lehesvuo, V. 2018. koulutustilaisuus, Keskijänniteverkkojen relesuojaus sähkölaitoksille.

Maviko. 2015. Maasulkuvirran kompensointi -koulutus 19.11.2015 -materiaali.

Maviko. 2018. [verkkoaineisto] [viitattu 23.3.2018] Saatavissa:

<https://www.maviko.fi/>

Pesonen, M. 2015. 20 KV ilmajohtoverkon maakaapeloinnin vaikutus maasulkusuojaukseen ja loistehotaseeseen. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Romppainen, P. 2016. Diskreetti Fourier-muunnos ja sen hyödyntäminen signaalien spektrien muodostamisessa. Kajaanin ammattikorkeakoulun julkaisusarja B. Kajaani: Kaajaanin ammattikorkeakoulu.

SFS 6000. 2017. SFS 6000 -standardi.

SFS 6001. 2015. SFS 6001 -standardi.

SLT-Consults. 2018. Sisäiset materiaalit.

Sähkömarkkinalaki, Finlex

www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588#Pidp451230656

Taking earth-fault protection to the next level – Multi-frequency admittance protection. ABB Group.

TTT-käsikirja. 2000. ABB Oy.

Tulomäki, H. 2017. Maasulkujen analysointi häiriötallennuksilla JE-Siirto Oy:ssä. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

Uusien suojien asettelut. 2017. ABB Oy.

Vihavainen, V. 2016. Tehomuuntajan differentiaalisuojaus. Opinnäytetyö. Mikkeli: Mikkelin ammattikorkeakoulu.

Vihavainen, V. 2018. Haastattelu maasulkusuojauksen asettelusta ja koestamisesta.

Wahlroos, A. & Altonen, J. 2011. Compensated networks and admittance based earth-fault protection. ABB Oy. Viitattu 19.11.2017.

Wahlroos, A. & Altonen, J. 2014. Application of novel multi-frequency neutral admittance method into earth-fault protection in compensated MV-networks. ABB Oy Medium Voltage Products Finland.

Wahlroos, A. 26.4.2016. Kompensoidun kaapeliverkon haasteet maasulkusuojaukselle. Webinaaritallenne. Viitattu 28.11.2017.

<https://www.youtube.com/embed/hA-VKn71ShA?html5=1&rel=0&wmode=transparent&autoplay=1>

Wahlroos, A. & Altonen, J. 2017. Compensated neutral networks and multi-frequency admittance protection. SEAPAC 17 – APB5 – Melbourne March 14th-15th. CIGRE. 1-44.

Wahlroos, A., Altonen, J. & Vano, P. 2017. Effect of core balance current transformer errors on sensitive earth-fault protection in compensated MV-networks. The 24th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, CIRED. Paper 0862 ,1-5.

Wahlroos, A. 2018a. Maailmanluokan osaamista katkeilevan maasulun suojaukseen -koulutusmateriaalit ja luento. ABB Oy.

Wahlroos, A. 2018b. Henkilökohtainen keskustelu koulutustilaisuudessa.

Zubić, S., Wahlroos, A., Altonen, J., Balcerek, P., and Dawidowski, P. 2016. Managing post-fault oscillation phenomenon in compensated MV-networks.

<https://www.finlex.fi/fi/esitykset/he/2002/20020218#idp451650912>